



Programa de
Recursos
Humanos



anp
Agência
Nacional do
Petróleo



PROGRAMA EQ-ANP

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria
do Petróleo e Gás Natural**



ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO PROCESSO BTL (BIOMASS-TO-LIQUID) PELA SÍNTESE FISCHER-TROPSCH NO BRASIL

Juliana Haas Peçanha Lessa

Projeto de Final de Curso

Orientadores

**Prof.^a Flávia Chaves Alves, D.Sc.
Prof. José Vitor Bomtempo Martins, D.Sc.**

Setembro de 2008

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO PROCESSO BTL (BIOMASS-TO-LIQUID) PELA SÍNTESE FISCHER- TROPSCH NO BRASIL

Juliana Haas Peçanha Lessa

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheira Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Gestão e Regulação.

Aprovado por:

Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Djane Rodrigues Cerqueira, M.Sc.

Juliana Nascimento Cardozo da Silva, Eng^a

Orientado por:

Flávia Chaves Alves, D.Sc.

José Vitor Bomtempo Martins, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2008

Lessa, Juliana Haas Peçanha

Análise técnico-econômica do processo BTL (biomass-to-liquid) pela síntese FISCHER-TROPSCH no Brasil / Juliana Haas Peçanha Lessa / Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

xiii, 77 p.; il.

Análise técnico-econômica do processo BTL (biomass-to-liquid) pela síntese FISCHER-TROPSCH no Brasil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008. Orientadores: Flávia Chaves Alves e José Vitor Bomtempo Martins

1.BTL. 2. Fischer-Tropsch. 3. Biomassa. 4. Análise técnico-econômica do processo BTL (biomass-to-liquid) pela síntese FISCHER-TROPSCH no Brasil (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Flávia Chaves Alves, D.Sc. 6. José Vitor Bomtempo Martins, D.Sc.

Aos meus pais e irmão

“Bom mesmo é ir a luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve... A vida é muita para ser insignificante”. (Charles Chaplin)

“Independentemente do que você seja, seja bom nisso”. (Abraham Lincoln)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Margareth e Gabriel pelo apoio, suporte e amor, por sempre terem acreditado no meu potencial e sempre me tranquilizaram nos momentos de maior angústia e que foram essenciais para que mais esta conquista fosse possível. Ao meu irmão Leonardo, por sempre cuidar de mim e sofrer com meu estresse nas vésperas de provas importantes.

À minha família: meus tios e tias, primos e primas e as minhas avós Landa e Mirian pelo apoio e carinho. Aos meus dindos Denise e Maneco, por todo amor e amizade.

Aos meus orientadores Flávia e José Vitor, pela paciência, e apoio sempre que solicitados.

À Chemtech pelo apoio e oportunidade de aprendizado e por sempre propor desafios extraordinários essenciais ao meu desenvolvimento profissional.

À Escola Técnica Federal de Química por ter proporcionado a base para que os anos na faculdade fossem mais tranquilos.

À Escola de Química da UFRJ, seus alunos e funcionários, por terem me dado um ensino superior de qualidade e por me proporcionar lembranças maravilhosas.

Aos meus amigos, cada um de vocês foi essencial para que eu me tornasse quem eu sou. E por isso sou grata a todos, e sempre os guardarei comigo.

Ao apoio financeiro da **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e biocombustíveis** – ANP – e da **Financiadora de Estudos e Projetos** – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao **PRH 13**, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheira Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Gestão e Regulação.

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO PROCESSO BTL (BIOMASS-TO-LIQUID) PELA SÍNTESE FISCHER-TROPSCH NO BRASIL

Juliana Haas Peçanha Lessa
Setembro, 2008

Orientadores: Prof.^a Flávia Chaves Alves, D.Sc.
Prof. José Vitor Bomtempo Martins, D.Sc.

Com o aumento da preocupação mundial em relação ao efeito estufa e ao uso de energias não renováveis foi aberta a oportunidade de pesquisas sobre energias alternativas geradas por biomassa. O crescente aumento do consumo de diesel no Brasil, e o avanço da síntese Fischer-Tropsch fizeram a tecnologia BTL uma alternativa para sua produção.

A tecnologia BTL pode ser dividida em: gaseificação, síntese Fischer-Tropsch e *upgrading*. Diversas matérias-primas biomássicas podem ser utilizadas no processo. Normalmente classificadas em herbáceas e lenhosas, necessitam de pré-tratamento antes de sua utilização sendo os mais usuais a pirólise rápida e a secagem. O bagaço de cana e o eucalipto são duas matérias-primas com potencial de utilização em uma planta BTL no Brasil.

A gaseificação de biomassa tem como objetivo transformar biomassa em gás de síntese e pode ser feita em diferentes tipos de gaseificadores. Classificados de acordo com o leito utilizado tais como: leito fixo, leito fluidizado e leito arrastado. Sendo o mais avançado o de leito arrastado.

A síntese Fischer-Tropsch consiste em transformar gás de síntese em hidrocarbonetos de cadeia longa em diferentes tipos de reatores, sendo o mais moderno o reator em lama. Os hidrocarbonetos formados passam por posterior *upgrading* para obtenção de diesel, nafta, gasolina e outros.

Existem no mundo diversas linhas de pesquisa, a mais avançada delas a propõe a utilização de gaseificador de leito arrastado, juntamente com um reator em lama.

Considerando-se esta linha de pesquisa o custo de produção do diesel sintético no Brasil, seria inferior ao biodiesel obtido pela transesterificação de lipídeos, porém superior ao do diesel tradicional.

Para contornar este obstáculo o biodiesel sintético poderia ser misturado ao diesel tradicional em um primeiro momento, para incentivar sua produção e obter experiência e know how para otimização do processo e posterior redução dos custos.

Os custos relacionados à biomassa são os que têm maior contribuição para o custo total de produção sendo assim pesquisas em diferentes tipos de matérias-primas, localização ideal e transporte são fundamentais para o desenvolvimento desta tecnologia.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Management and Regulation.

TECHNICAL AND ECONOMICS ANALYSIS OF THE BTL (BIOMASS-TO-LIQUID) TECHNOLOGY VIA FISCHER-TROPSCH SYNTHESIS IN BRAZIL

Juliana Haas Peçanha Lessa
September, 2008

Supervisors: Prof. Flávia Chaves Alves, D.Sc
Prof. José Vitor Bomtempo, D.Sc

The global concern about the global warming and the use of non-renewable energy lead to the opportunity of researches about alternative energies produced with biomass. The raising consumes of diesel and the advanced in the Fischer-Tropsch synthesis made the BTL (biomass-to-liquid) an alternative to the diesel production.

The BTL technology can be divided in gasification, Fischer-Tropsch synthesis and upgrading. Numerous biomass input can be use in the process. Biomasses are commonly classified in woody and herbaceous, and demand pre-treatment to make it suitable to use. The most common pre-treatments are the fast pyrolyses and drying. The sugarcane bagasse and eucalypt potential inputs for a BTL plant in Brazil.

The biomass gasification goal is convert biomass in syngas e can be done in different types of gasifiers. They are classified by the type of bed they use, and can be: fixed bed, fluidized bed and entrained flow. The most advanced one is the entrained flow.

The Fischer-Tropsch synthesis consist in convert syngas in long chain hydrocarbon, different types of reactors are used to this, the most modern one is the slurry phase reactor. The hydrocarbons need to do a posterior upgrading to produce diesel, gasoline, naphtha and etc.

In the moment are some different concepts being development in the world the most advanced one uses an entrained flow gasifier and a slurry phase reactor.

Using this concept the production cost of de synthetic diesel would be lower than the transesterification biodiesel, and higher than the traditional diesel production cost.

To outgrow this, the synthetic biodiesel could be mix up with convention diesel in a first moment, to incentive the production e obtain know how to the process optimization, and with that the posterior reduction of cost could make the synthetic biodiesel viable to be commercialized.

The cost related to the biomass are the ones with biggest impact on the total production cost, because of that researches about utilization of different types of biomass, ideal location and inputs transportation are essential.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Capítulo I. Introdução | 1 |
| I.1 Objetivo | 4 |
| Capítulo II. Matérias-Primas para o processo BTL | 5 |
| II.1 Matéria-prima herbácea | 6 |
| II.1.1 Processos de pirólise..... | 7 |
| II.2 Matérias-Primas Lenhosas..... | 7 |
| II.2.1 Processos de corte e compactação | 9 |
| II.2.2 Secagem..... | 10 |
| II.3 Propriedades Físico-químicas das Matérias-Primas Biomássicas | 11 |
| II.4 Matérias-primas para o processo BTL no Brasil | 13 |
| II.4.1 A produção de bagaço de cana | 14 |
| II.4.2 Produção de eucalipto..... | 16 |
| II.5 Conclusão | 17 |
| Capítulo III. Gaseificação e Síntese Fischer-Trosch | 19 |
| III.1 Gaseificação..... | 19 |
| III.1.1 Reações envolvidas..... | 21 |
| III.1.2 Principais Tipos de gaseificadores | 21 |
| III.1.2.1 Gaseificadores de leito Fixo | 22 |
| III.1.2.2 Gaseificadores de leito Fluidizado | 24 |
| III.1.2.3 Gaseificadores de leito arrastado | 25 |
| III.2 Síntese Fischer-Tropsch | 26 |
| III.2.1 Reações | 26 |
| III.2.2 Reatores | 27 |
| III.2.2.1 Reator Tubular de Leito Fixo | 27 |
| III.2.2.2 Reator de Leito Fluidizado | 28 |
| III.2.2.3 Reator de Leito em Lama | 29 |
| III.2.3 Produtos gerados | 30 |
| Capítulo IV. Estado da Arte e Análise Tecnológica | 31 |
| IV.1 Gaseificação em leito fluidizado circulante para síntese de diesel, cEF-D.... | 32 |
| IV.1.1 Descrição do processo | 33 |
| IV.2 Gaseificação descentralizada em leito arrastado para síntese de diesel, dEF-D | |

| | | |
|-----------------------|--|-----------|
| IV.2.1 | Descrição do processo | 36 |
| IV.3 | Gaseificação em leito fluidizado circulante para síntese de diesel, CFB-D... 37 | |
| IV.3.1 | Descrição do processo | 38 |
| IV.4 | Gaseificação interna em leito fluidizado circulante para a síntese de diesel, ICFB-D..... | 39 |
| IV.4.1 | Descrição do processo | 40 |
| IV.5 | Análises tecnológica | 41 |
| IV.6 | Conclusão | 44 |
| Capítulo V. | Metodologia dos cálculos de custos para análise econômica | 45 |
| V.1 | Princípios básicos. | 45 |
| V.2 | Investimento Total..... | 45 |
| V.3 | Custo de Produção | 47 |
| V.3.1 | Custo de Insumos | 47 |
| V.3.2 | Custo de Operação e outros custos | 49 |
| V.3.3 | Custos relacionados ao capital..... | 49 |
| V.3.4 | Custo recuperados com a revenda de sub-produtos..... | 49 |
| Capítulo VI. | Resultados do cálculo do Investimento Total e dos Custos de Produção | 50 |
| VI.1 | Considerações admitidas | 50 |
| VI.2 | Resultados do Investimento Total e do Custo de Produção: Bagaço de cana- de-açúcar | 51 |
| VI.3 | Resultados Investimento Total e do Custo de Produção: Eucalipto..... | 52 |
| VI.4 | Resultados do Investimento Total e de Produção: 50% Eucalipto+50% Bagaço de cana 53 | |
| VI.5 | Conclusão | 54 |
| Capítulo VII. | Análise de sensibilidade do Investimento Total e do Custo de Produção: Bagaço de cana-de-açúcar | 57 |
| VII.1 | Introdução..... | 57 |
| VII.2 | Análises de sensibilidade..... | 57 |
| VII.3 | Conclusão | 60 |
| Capítulo VIII. | Considerações Finais | 61 |
| Capítulo IX. | Referencias | 63 |
| Anexo A | | 66 |

| | |
|--|----|
| Investimento Total Matéria-Prima Herbácea | 66 |
| Investimento Total Matéria-Prima Lenhosa..... | 68 |
| Investimento Total Matéria-Prima 50% Herbácea+50% Lenhosa..... | 70 |
| Anexo B | 72 |
| Custo de Produção Matéria-Prima Herbácea | 72 |
| Custo de Produção Matéria-Prima Lenhosa..... | 74 |
| Custo de Produção Matéria-Prima Lenhosa..... | 76 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura I-1- Relação entre Concentração de CO ₂ e temperatura terrestre..... | 1 |
| Figura I-2 Esquema do processo BTL pela síntese Fischer-Tropsch | 3 |
| Figura II-1 Composição da Matriz Energética brasileira Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2008)..... | 5 |
| Figura II-2 Formas de transporte de madeira. | 9 |
| Figura II-3 Diferentes formas de compactação da biomassa | 10 |
| Figura II-4 Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil e em São Paulo..... | 14 |
| Figura II-5 Preço do bagaço de cana, usina Galo Bravo. | 15 |
| Figura III-1 Gaseificadores em co-corrente a direita, e contracorrente a esquerda..... | 22 |
| Figura III-2 Gaseificadores de leito fluidizado, Leito fluidizado circulante a esquerda e leito fluidizado borbulhante a direita..... | 25 |
| Figura III-3 Gaseificação da biomassa e síntese de Fischer-Tropsch | 27 |
| Figura III-4 Reator tubular de leito fixo para síntese Fischer-Tropsch | 28 |
| Figura III-5 Reatores de leito fluidizado para a síntese Fischer-Tropsch..... | 29 |
| Figura III-6 Reator de leito em lama para a síntese Fischer-Tropsch | 29 |
| Figura III-7 Composição típica do produto da síntese Fischer-Tropsch | 30 |
| Figura IV-1 Processo BTL da Choren..... | 32 |
| Figura IV-2 Processo de gaseificação e purificação da Choren | 33 |
| Figura IV-3 Esquema do processo de obtenção de diesel desenvolvido pela Choren ... | 35 |
| Figura IV-4 Esquema do processo de obtenção de diesel da FZK..... | 36 |
| Figura IV-5 Esquema do processo de obtenção de diesel da CUTEC | 38 |
| Figura VII-1 Distribuição dos custos de produção..... | 58 |
| Figura VII-2 Análise de sensibilidade | 60 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela II-1 Especificações técnicas: Carvão, Gás Natural e matérias-primas biomássicas..... | 12 |
| Tabela II-2 Distribuição geográfica brasileira - utilização das áreas do território nacional por ocupação..... | 13 |
| Tabela II-3 Utilização e destinação da biomassa de cana-de-açúcar nas usinas pesquisadas | 15 |
| Tabela II-4 Quantidade dos produtos florestais oriundos de plantações de eucalipto em 2000 | 16 |
| Tabela II-5 Produção Florestal por estado..... | 16 |
| Tabela II-6 Comparação do cultivo de eucalipto entre Brasil e o resto do mundo | 17 |
| Tabela III-1 Especificações do gás de síntese para utilização no processo Fischer-Tropsch | 20 |
| Tabela III-2 Comparação entre gaseificadores de leito fixo..... | 23 |
| Tabela IV-1 Semelhanças e Diferenças entre a tecnologia BTL e as tecnologias GTL/CTL (vermelho=diferenças, verde=semelhanças)..... | 41 |
| Tabela IV-2 Principais diferenças técnicas dos processos estudados..... | 42 |
| Tabela IV-3 Análise do grau de maturidade dos processos de obtenção de diesel | 43 |
| Tabela IV-4 Cronograma de implementação da energia BTL | 44 |
| Tabela V-1 Cálculo do Investimento total..... | 46 |
| Tabela V-2 Dados para o cálculo do fator de implementação..... | 46 |
| Tabela V-3 Preço dos Insumos consumidos na conversão de biomassa | 48 |
| Tabela V-4 Parâmetros considerados para cálculo de custos com operação e outros custos | 49 |
| Tabela VI-1 Considerações utilizadas no estudo..... | 50 |
| Tabela VI-2 Investimento Total utilizando bagaço de cana-de-açúcar | 52 |
| Tabela VI-3 Custo de produção de Diesel utilizando bagaço de cana-de-açúcar | 52 |
| Tabela VI-4 Investimento Total utilizando eucalipto..... | 52 |
| Tabela VI-5 Custo de produção de Diesel utilizando eucalipto | 53 |
| Tabela VI-6 Investimento Total para planta utilizado 50% de bagaço de cana + 50% de eucalipto | 53 |

| | |
|---|----|
| Tabela VI-7 Custo de produção de Diesel para planta utilizado 50% de bagaço de cana + 50% de eucalipto | 53 |
| Tabela VI-8 Comparação entre os custos de produção de diesel utilizando matéria-prima lenhosa no Brasil e na União Européia..... | 54 |
| Tabela VI-9 Comparação entre os custos de produção de diesel utilizando matéria-prima herbácea no Brasil e na União Européia..... | 55 |
| Tabela VI-10 Custo de produção de biodiesel pela reação de transesterificação..... | 55 |
| Tabela VII-1 Investimento Total e Custo de Produção | 57 |
| Tabela VII-2 Análise de sensibilidade quanto ao preço do bagaço..... | 58 |
| Tabela VII-3 Análise de sensibilidade quanto a distância da fonte fornecedora de biomassa | 59 |
| Tabela VII-4 Sensibilidade quanto a capacidade instalada | 59 |

Capítulo I. Introdução

O aumento da temperatura média global tem gerado uma crescente preocupação mundial a respeito das suas causas. Uma corrente que vem ganhando força nos últimos anos é de que o gás CO₂ na atmosfera transformá-la-ia em uma espécie de estufa, isto é permitiria que o calor proveniente do sol penetrasse na atmosfera, mas impediria sua saída, causando assim um aumento na temperatura do globo.

O CO₂ é um gás presente na atmosfera terrestre há milhões de anos, com sua concentração apresentando variações cíclicas, de aumento e diminuição (gerando eras glaciais inclusive) e conseqüente acompanhamento da temperatura. Porém nos últimos séculos o aumento desta concentração extrapola os picos históricos registrados, seu aumento substancial teve início próximo ao advento das máquinas a vapor, e da revolução industrial, aumentando ainda mais nas décadas seguintes causado pelo aumento da industrialização mundial. Todas estas observações podem ser visualizadas na Figura I-1.

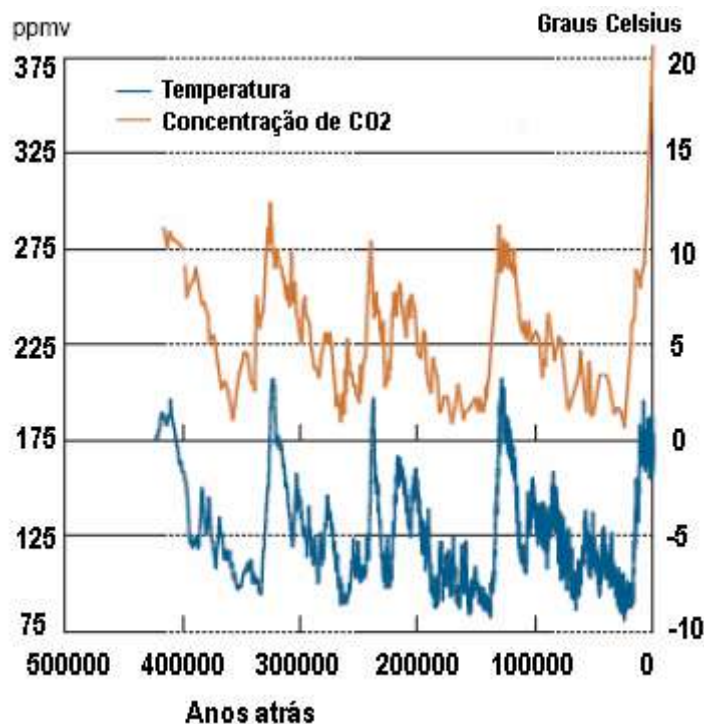


Figura I-1 Relação entre Concentração de CO₂ e temperatura terrestre

Fonte: Opdal et al., 2006

O diesel é uma das principais fontes de energia consumidas no Brasil, correspondendo a 17,3% do consumo total de energia e a 50,7% de toda energia

utilizada pelo setor de transporte (Balanço Energético Nacional, 2008). A produção de óleo diesel teve um aumento de 1,5% em relação ao ano anterior. Este aumento na produção não foi suficiente para diminuir a dependência da importação. Apesar da auto-suficiência no volume de petróleo produzido, a quantidade de diesel produzido no país ainda não é suficiente para abastecer o mercado interno.

O contínuo aumento da frota de veículos e alta dependência do transporte rodoviário inclusive no transporte de produtos e matérias-primas para uso industrial, contribuem significativamente com o elevado número de importações.

O preço do diesel vem aumentando ao longo dos anos, principalmente no primeiro semestre de 2008, chegando a um preço de médio de R\$2,1028/l (ANP, 2008). Somente no Brasil é estimado que a frota de veículos tenha aumentado 27,3% nos últimos 7 anos (ABRAC) chegando aos 25 milhões de veículos. O conseqüente aumento na quantidade de combustível queimado e transformado em CO₂ faz com que os veículos automotivos, sejam um dos grandes responsáveis pelo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera.

A atual instabilidade no preço do barril do petróleo, atingindo preços recordes, somente no primeiro trimestre de 2008 um aumento de 35% e um aumento acumulado de maio de 2007 a maio de 2008 de 100% (BPI, 2008), impulsionou o número de projetos de pesquisa a fim de se encontrar alternativas economicamente viáveis para sua substituição.

Com isso alternativas de combustíveis que diminuam a emissão de CO₂ e que sejam substitutos para o petróleo estão sendo consideradas.

Uma destas alternativas é a tecnologia BTL (biomass-to-liquid), que propõe a utilização de biomassa para fabricação de combustíveis (e outros produtos petroquímicos) a partir de biomassa. A produção de diesel por esta rota tecnológica apresenta um grande potencial de desenvolvimento por poder contar com toda a logística de distribuição já existente, não necessitar de mudanças nos motores dos veículos e por ser fabricado por produto de origem vegetal, e conseqüentemente renovável, não teria impacto na emissão de CO₂, já que todo o CO₂ produzido na sua queima foi retirado da atmosfera.

A tecnologia BTL propõe a transformação de biomassa em combustível líquido. O processo pode ser dividido em três etapas principais: Gaseificação, Síntese e tratamento posterior (*upgrading*, destilação e etc.).

A etapa de síntese considerada neste estudo será a síntese de Fischer-Tropsch (FT) apesar de serem encontradas outras rotas na literatura.

Além destes processos principais são necessários, outras etapas secundárias, como o pré-tratamento da biomassa, a purificação e condicionamento do gás de síntese produzido.

A Figura I-2 mostra de maneira esquemática o processo BTL.

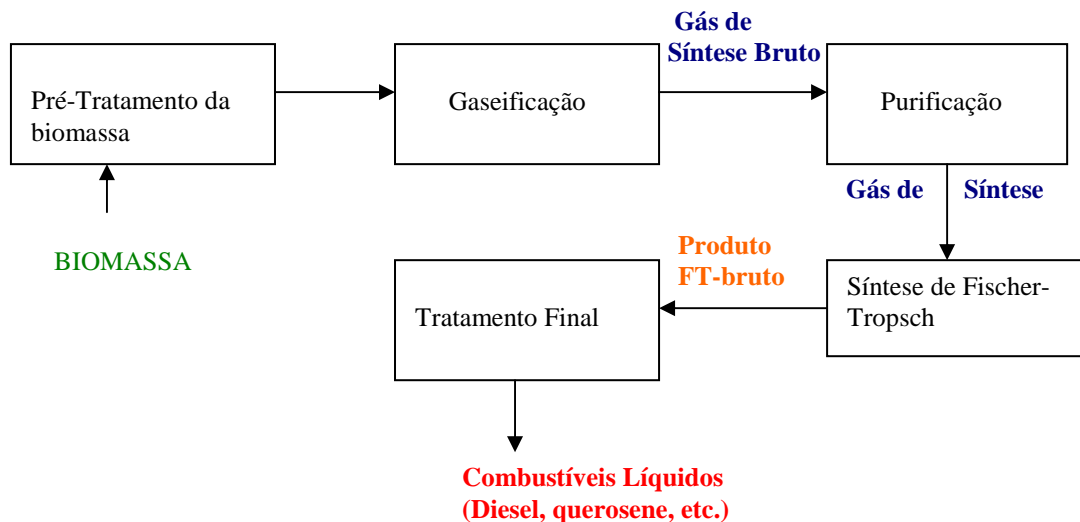


Figura I-2 Esquema do processo BTL pela síntese Fischer-Tropsch

Fonte: Própria

A biomassa é primeiro cortada, e passa por um processo de secagem para retirada da umidade, segue então para a gaseificação gerando gás de síntese bruto (com uma quantidade grande de impurezas). O gás é em seguida purificado por meio de uma gama de processos para atinja as especificações necessárias para o processo seguinte. A síntese Fischer-Tropsch de conversão de gás de síntese em cadeias longas de hidrocarbonetos é feita utilizando-se catalisadores o que leva a elevados graus de especificidade do gás de síntese utilizado. O produto gerado é então submetido a tratamento para aumento da cadeia de hidrocarbonetos e/ou destilação dos produtos de interesse, que neste trabalho será o diesel.

O principal desafio no desenvolvimento desta tecnologia, encontra-se na etapa de gaseificação. Pois ao contrário da etapa de síntese Fischer-Tropsch, que já era utilizada para os processos GTL (gas-to-liquid) e CTL (coal-to-liquid), que usam gás natural e carvão como matéria-prima, a gaseificação de biomassa ainda não é uma tecnologia completamente desenvolvida.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise, técnico-econômica da tecnologia BTL no Brasil através do estudo do estado da arte desta tecnologia, da análise do Investimento Total necessário para sua implementação e do custo de produção o diesel.

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos além desta introdução.

No capítulo 2 será feita a caracterização das matérias-primas biomássicas utilizadas para o processo BTL, serão apresentadas também duas matérias-primas biomássicas com grande potencial de utilização em uma planta no Brasil.

No capítulo 3 é feita a revisão bibliográfica das principais etapas do processo BTL, gaseificação e síntese Fischer-Tropsch.

O capítulo 4 é dedicado a descrever o estado da arte da tecnologia, apresentando as 4 principais linhas de pesquisas existentes. É também feita uma análise tecnológica comparativa entre as linhas de pesquisa.

Capítulo 5, descreve a metodologia utilizada nos cálculos de Investimento Total e custo de produção do diesel. Enquanto o capítulo 6 expõe os resultados destes cálculos.

No capítulo 7 é feita uma análise de sensibilidade do custo de produção e finalmente no capítulo 8 são feitas as considerações finais do estudo.

Capítulo II. Matérias-Primas para o processo BTL

Diversas fontes de matérias-primas biomássicas estão disponíveis em abundância na natureza. Por isso, a biomassa vem sendo utilizada como matéria-prima para a geração de energia há milhões de anos, desde a descoberta do fogo.

A única exigência para que uma matéria-prima biomássica possa ser utilizada como insumo para o processo BTL, é que esta possua Carbono e Hidrogênio em sua composição. Isso leva a um elevado número de matérias-primas passíveis de serem utilizadas para o processo. De madeira de florestas cultivadas a resíduos, praticamente qualquer material orgânico pode ser utilizado, variando a necessidade de tratamento do material. As biomassa podem ainda ter origem vegetal ou animal, sendo o foco deste estudo as matérias-primas de origem vegetal.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2008, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é estimado que cerca de 15,6% da energia utilizada no Brasil em 2007 seja proveniente de fontes biomássicas (lenha, carvão vegetal e etc.), como mostrado na Figura II-1.

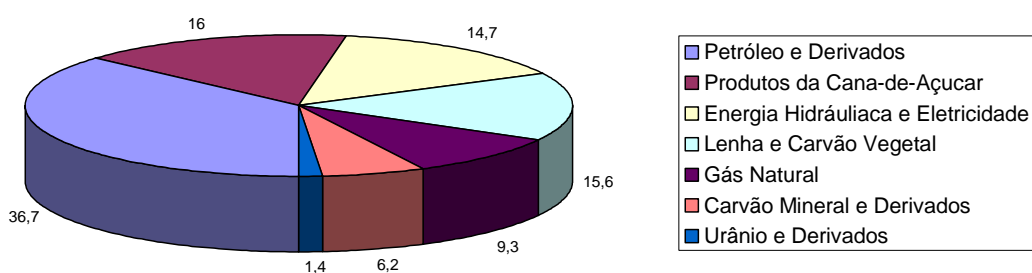


Figura II-1 Composição da Matriz Energética brasileira

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2008).

A biomassa vegetal é dividida em dois grandes grupos, de acordo com a consistência do caule: biomassas lenhosas e herbáceas. As biomassas herbáceas

possuem caules sem lignina, verdes e flexíveis. Já as lenhosas possuem caules com lignina, rígidos, de porte geralmente avantajado. (Lamam, 2008)

A seguir são apresentadas as principais características das matérias-primas biomássicas, de forma a comparar seu potencial como insumo para o processo BTL.

II.1 Matéria-prima herbácea

Matérias-primas herbáceas possuem tecidos tenros, portanto moles, frágeis, e comumente verdes. São exemplos de biomassas herbáceas o tomateiro, aboboreira, couve, bagaço de cana-de-açúcar, dentre outros.

No Brasil, o uso de biomassa herbácea na geração de energia não é algo recente. Na década de 70, durante a crise do petróleo, o governo fez grandes investimentos para o desenvolvimento de combustível obtido através de matérias-primas alternativas, simbolizado pelo programa Pró-Alcool (Banco de dados de biomassa no Brasil, 2008). Através desse programa desenvolveu-se a tecnologia de obtenção de etanol para uso como combustível veicular, utilizando cana-de-açúcar como matéria-prima. Após a crise, por motivos diversos, houve uma queda no uso do etanol. No entanto, a crescente preocupação ambiental, aumentos constantes no preço do petróleo e a busca por sua substituição, deram novo fôlego ao desenvolvimento de tecnologias para obtenção de etanol nesta última década. A geração de etanol pela cana-de-açúcar gera grandes quantidades de bagaço de cana, que podem ser disponibilizados para gaseificação a preços baixos, tornando-se assim um potencial insumo para o processo BTL. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2008 foram produzidos no Brasil, no ano de 2007, 136.717 kton de bagaço de cana (EPE, 2008).

As matérias-primas herbáceas possuem a vantagem de praticamente dispensarem a etapa de secagem antes da gaseificação, só necessitando serem cortadas. Isso porque elas apresentam baixa umidade. Além disso, geralmente, as matérias-primas herbáceas têm um menor custo que as lenhosas.

Porém, todas estas vantagens são poucas quando comparadas com seu principal obstáculo para uso: ela possui baixa densidade energética, ou seja, para produzir a mesma quantidade de energia que uma matéria-prima lenhosa, é necessária uma maior quantidade de matéria-prima, isto aumenta o custo com o transporte e com o manuseio.

Além disso, o gás de síntese produzido apresenta um elevado teor de contaminantes indesejáveis (como enxofre, cloro, potássio e outros), que leva a uma redução no seu potencial de utilização, já que pode provocar incrustações, corrosão e entupimento nos equipamentos do processo, além de serem um potencial envenenador do catalisador da síntese Fischer-Tropsch . (Kavalov et al., 2005). Por estes motivos, a matéria-prima herbácea não é utilizada diretamente para gaseificação, sofrendo antes o processo de pirólise rápida, onde o óleo de pirólise é formado e, posteriormente, gaseificado.

II.1.1 Processos de pirólise

A pirólise é a degradação térmica de material orgânico na ausência parcial, ou total de um agente oxidante, ocorre geralmente a uma temperatura superior aos 400°C.

Durante o processo são produzidos gases, sólidos e líquido, em diferentes proporções, dependendo das condições de operação do processo. Uma maneira de favorecer a produção da fase líquida é através da pirólise rápida.

Segundo Rocha (2007) a pirólise rápida de biomassa é um processo em que a fragmentação do combustível sólido ocorre através do uso de calor em atmosfera com baixa concentração de oxigênio. Outras características do processo são o curto tempo de aquecimento das partículas e de residência para os vapores (inferior a 2 segundos), elevadas taxas de aquecimento, elevados coeficientes de transferência de calor e de massa e temperaturas moderadas da fonte de aquecimento. (Gómez, 2008)

A maior vantagem em se transformar a biomassa em óleo de pirólise é que este possui poder calorífico de 31,41 GJ/t (Rocha, 2008), contra 18,11 GJ/t (Falabella et al.,2007) do bagaço de cana por exemplo.

II.2 *Matérias-Primas Lenhosas*

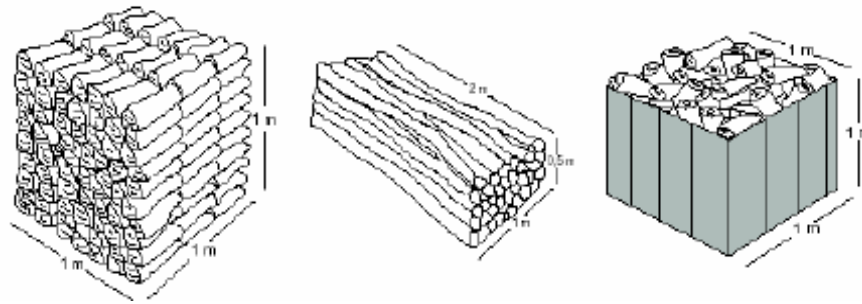
A matéria-prima lenhosa é constituída basicamente de celulose (41-49%), hemicelulose (15-27%) e lignina (18-24%) (Banco de dados de biomassa no Brasil, 2008). São exemplos de matérias-primas lenhosas: eucalipto, pinheiro, macieira, etc.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2008 foram produzidos no Brasil, no ano de 2007, 96.523 kton de lenha (EPE, 2008).

As matérias-primas lenhosas podem ser provenientes de diversas fontes:

- Florestas naturais – as toras de madeira são consideradas as matérias-primas ideais para o uso no processo FT por serem puras, terem composição homogênea e estarem disponíveis na natureza, porém o custo ambiental da sua utilização é alto, pois acarretaria um aumento do desmatamento, destruindo além da fonte de alimento de animais e humanos (árvores frutíferas) como também o habitat natural de animais da floresta, sendo vista como uma alternativa condenável pelos governos e pela sociedade.
- Florestas cultivadas – o cultivo de florestas parece ser uma opção viável para a obtenção de toras de madeiras, utilizada há bastante tempo pela indústria do papel. Dados da Aracruz Celulose (2008) mostram que o cultivo de eucalipto no Brasil vem apresentando excelentes resultados, pois possui um curto tempo de crescimento, cerca de 7 anos, e uma alta produtividade, $45\text{m}^3/\text{hectare}/\text{ano}$ contra 3 m^3 nos EUA e 25 m^3 do resto do mundo.
- Resíduos – por serem considerados rejeitos de outros processos industriais, os resíduos de madeira têm a vantagem de não possuir praticamente nenhum custo. Estima-se que entre 25 e 50% (IEA, 2002) da madeira produzida no mundo se torne resíduo. No entanto, apresenta como principal desvantagem uma composição heterogênea, o que torna necessário um pré-tratamento ainda mais rigoroso.

Apesar de possuir densidade energética superior a das biomassas herbáceas, esta ainda é pequena quando comparada com outras fontes de energia como o petróleo e o carvão mineral. A fim de se diminuir os gastos com transporte e manejo, é necessário diminuir o volume ao máximo. Para isso podem ser empregadas diversas formas de arrumação da matéria-prima coletada. A Figura II-2 ilustra isso.



Madeira cortada,
separada e empilhada,
NVC = 7.6 - 8.6 GJ

Toras inteiras
empilhadas,
NVC = ~6.5 GJ

Toras soltas,
NVC = ~4.8 GJ
(pedaços de 40 cm)

Figura II-2 Formas de transporte de madeira.

Fonte: Kavalov et al., 2005

A matéria-prima lenhosa pode ainda sofrer diversos tipos de pré-tratamentos para facilitar sua secagem e alimentação nos gaseificadores.

Os principais pré-tratamentos utilizados são processos de corte e compactação (geração de chips de lenha, pellets, pó de madeira, serragem etc.) e secagem, conforme descritos a seguir.

II.2.1 Processos de corte e compactação

Os processos de corte e compactação da madeira têm como principais objetivos facilitar o transporte e manejo da biomassa, sua secagem (pelo aumento da área superficial facilitando a evaporação da água) e sua alimentação nos gaseificadores. Os processos mais comumente utilizados são o de *chipping*, moagem e pelletização.

O Processo de *chipping* gera um produto com tamanho entre 5-60 mm, com teor de água nos chips de madeira fresca bastante elevado - na ordem de 45-55% (Christou, 2004; Rudloff, 2004; Wolf, 2002) do peso. É o tratamento de compactação mais barato quando comparado com o de moagem e pelletização.

O processo de moagem, apesar de ser mais custoso energeticamente, produz pós de madeira finos - na ordem de 1 mm – também com elevado teor de água. Sua principal vantagem em comparação aos chips é que, por possuir um tamanho de partícula menor, tanto a gaseificação como a secagem são facilitadas.

Os pellets possuem normalmente de 10-33 mm de comprimento e de 8-12 mm de diâmetro, são obtidos através de pós de diversos resíduos de biomassa ou de serragem, que são forçados sobre uma forma (matriz) de alta pressão seguida de resfriamento rápido, que visa aumentar sua durabilidade e estabilidade. Sua principal vantagem em relação às outras formas de compactação é o aumento da densidade energética e, conseqüentemente, diminuição nos custos de transporte, manuseio e armazenagem. Porém entre os três é o que possui a menor eficiência energética de processo, já que para sua obtenção necessita de 2 processos: moagem e pelletização.

A Figura II-3 apresenta os diferentes formatos obtidos a partir dos processos de corte e compactação de biomassas lenhosas.



**Figura II-3 Diferentes formas de compactação da biomassa –
Da esquerda para direita - chips de madeira, serragem, casca e pellets.**

Fonte: Kavalov et al.(2005)

II.2.2 Secagem

A secagem é uma etapa crucial no processo de pré-tratamento da biomassa, isto por que um alto teor de água pode provocar obstrução no gaseificador. Segundo diversos estudos (Christou, 2004; Rudloff, 2004; Wolf, 2002), para evitar este problema, a umidade deve ser reduzida para 5-25% .

Existem três maneiras de diminuir a umidade da madeira, sendo aconselhável realizá-las em seqüência de forma a otimizar os resultados. São elas:

- Secagem natural da madeira

Neste processo as toras de árvores derrubadas são deixadas ao ar livre para que percam umidade ao longo do tempo. O teor de umidade pode cair para 35-45% de umidade não sendo, portanto, suficiente para o uso direto no gaseificador. Apesar da óbvia vantagem em termos de custos, já que o processo não requer nenhum esforço

significativo, deixar a madeira ao ar livre pode resultar em perda de massa por decomposição natural e/ou infestação de insetos.

- Secagem natural dos chips e pellets

As mesmas considerações feitas para a secagem das toras de madeira são feitas aqui, A diferença, porém, é que com o aumento da área superficial, a perda de massa por decomposição é consideravelmente elevada, e deve-se estar atento para isso. (Kavalov et al., 2005).

- Secagem forçada da biomassa lenhosa

A utilização de calor para acelerar o processo de secagem diminui o tempo necessário para o processo e favorece a diminuição no teor de água. Porém seu uso deve ser feito com alguma cautela já que, caso haja necessidade de geração de calor especificamente para a secagem, acarretará em uma diminuição da eficiência energética do processo. Caso exista calor disponível (proveniente de outras etapas do processo) o seu uso irá até aumentar sua eficiência.

De maneira geral deve-se sempre analisar os benefícios gerados pelo processo de secagem e os custos adicionais envolvidos em realizá-la.

II.3 Propriedades Físico-químicas das Matérias-Primas Biomássicas

As matérias-primas biomássicas apresentam algumas propriedades que dificultam sua utilização como insumo energético. A Tabela II-1 apresenta as propriedades de algumas matérias-primas, usualmente disponíveis, além das propriedades do carvão e do gás natural.

Tabela II-1 Especificações técnicas: Carvão, Gás Natural e matérias-primas biomássicas.

| | Carvão Betuminoso | Gás Natural | Eucalipto | Casca | Carvalho | Resíduos de Floresta | Chips de Madeira | Pellets de Madeira | Fibras de Cereal | Bagaço de cana-de-açúcar |
|--------------------------------|-------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------------|
| Cinzas, d% | 8.5-10.9 | 0 | 0.41 | 3.5-8 | 1.1-4.0 | 1.0-3.0 | 0.8-1.4 | 0.4-1.5 | 3-10.0 | 2.2 |
| Umidade, w% | 5-10.0 | 0 | 41.5 | 45-65 | 50-60 | 30-60 | 20-50 | 7.0-10 | 14-25 | 50.2 |
| Poder Calorífico, MJ/kg | 26-28.3 | 48 | 19.42 | 18.0-23 | 18.4-19.2 | 18.5-20 | 19.2-19.4 | 16.2-19 | 16.5-17.4 | 18.1 |
| Densidade, kg/m ³ | 1100-1500 | n.a | 390-640 | 320 | 120 | n.a | 250-350 | 500-780 | 100-170 | 143.16 |
| Parte volátil, w% | 25-40 | 100 | 77.5 | 69.6-77-2 | >70 | >70 | 76-86 | >70 | 70-81 | 79.9 |
| Ponto de fusão das Cinzas, t°C | 1100-1400 | - | 1400-1700 | 1300-1700 | n.a. | n.a | 1000-1400 | >1120 | 700-1000 | |
| C, d% | 76-87 | 75 | 47.5 | 48-52 | 47-51 | 48-52 | 47-52 | 48-52 | 45-48 | 44.6 |
| H, d% | 3.5-5 | 24 | 6.0 | 4.6-6.8 | 5.8-6.7 | 6.0-6.2 | 6.1-6.3 | 6.0-6.4 | 5.0-6.0 | 5.8 |
| N, d% | 0.8-1.5 | 0.9 | 1.0 | 0.3-0.8 | 0.2-0.8 | 0.3-0.5 | <0.3 | 0.27-0.9 | 0.4-0.6 | 0.6 |
| O, d% | 2.8-11.3 | 0.9 | 44.0 | 24.3-42.4 | 40-46 | 40-44 | 38-45 | ~40 | 36-48 | 44.5 |
| S, d% | 0.5-3.1 | 0 | 1.5 | <0.05 | 0.02-0.10 | <0.05 | <0.05 | 0.04-0.08 | 0.05-0.2 | 0.1 |
| Cl, d% | <0.1 | - | 0.01-0.03 | 0.01-0.03 | 0.02-0.05 | 0.01-0.04 | 0.02 | 0.02-0.04 | 0.14-0.97 | 0.02 |
| K, d% | 0.003 | - | 0.02-0.05 | 0.1-0.4 | 0.2-0.5 | 0.1-0.4 | ~0.02 | n.a | 0.69-1.3 | - |
| Ca, d% | 4-12.0 | - | 0.1-1.5 | 0.02-0.08 | 0.2-0.7 | 0.2-0.9 | ~0.04 | n.a | 0.1-06 | - |

Fonte: Adaptado de Kavalov et al.(2005) e Fallabela et al.(2007)

As principais diferenças são quanto a menor quantidade de carbono e conseqüente menor poder calorífico (ou densidade energética) da biomassa frente as outras fontes de energia. As implicações disto é a necessidade de maiores quantidades de biomassa para a produção de uma mesma quantidade de energia, o que implica em um aumento dos custos com o transporte e armazenagem (influenciados também pela menor densidade), o que pode ser compensado pelo menor preço da biomassa.

II.4 *Matérias-primas para o processo BTL no Brasil*

O potencial brasileiro para o cultivo de biomassa que pode ser destinado para uso energético é enorme. Estima-se que 8,3% da área total do país são de áreas inexploradas disponíveis para agricultura (não se considerando a Floresta Amazônica), o que representa 71 milhões de hectares. Esta área é igual ao total explorado pelo país em lavouras temporárias e permanentes, sugerindo-se que é possível explorar o uso de terra para este fim, sem comprometer a capacidade de abastecimento para a população (Bracelpa, 2008). A Tabela II-2 apresenta, para o ano de 2007, a distribuição do território brasileiro quanto à sua utilização.

Tabela II-2 Distribuição geográfica brasileira - utilização das áreas do território nacional por ocupação

| 2007 | Milhão de Hectares | % |
|--|---------------------------|-------------|
| Unidades de Conservação Federais e Estaduais | 176 | 20,7% |
| Pastagem e Campos Naturais | 172 | 20,2% |
| Áreas Devolutas e Outros Usos | 171 | 20,1% |
| Áreas Indígenas | 107 | 12,6% |
| Áreas de Assentamentos Rurais | 77 | 9,0% |
| Áreas Inexploradas Disponíveis para Agricultura (não considera Floresta Amazônica) | 71 | 8,3% |
| Lavouras Temporárias | 55 | 6,5% |
| Lavouras Permanentes | 17 | 2,0% |
| Florestas Cultivadas | 5 | 0,6% |
| BRASIL | 851 | 100% |

Fonte: IBGE, MAPA, Conab, ABRAF, INCRA e MMA

Fonte: Bracelpa, 2008

No âmbito da aplicação de tecnologia BTL no Brasil, as matérias-primas mais indicadas são o bagaço de cana-de-açúcar – devido a sua grande oferta, em consequência da produção de etanol e açúcar – e o eucalipto, que já possui grande infraestrutura e know-how de produção devido aos vários anos de produção para indústria de papel e celulose.

II.4.1 A produção de bagaço de cana

A crescente produção de cana-de-açúcar no Brasil, impulsionada pelo aumento na demanda de álcool combustível, teve como consequência um aumento na geração de bagaço de cana. O bagaço corresponde a 25-30% em peso de cana moída, chegando a um volume de produção na ordem de 100 milhões de toneladas por ano, de acordo com o Ministério das Minas e Energia (MME) (2003).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. E o estado de São Paulo é o maior produtor nacional, com cerca de 60% da produção (UNICA 2004). A Figura II-4 mostra a evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil e em São Paulo nos últimos anos.

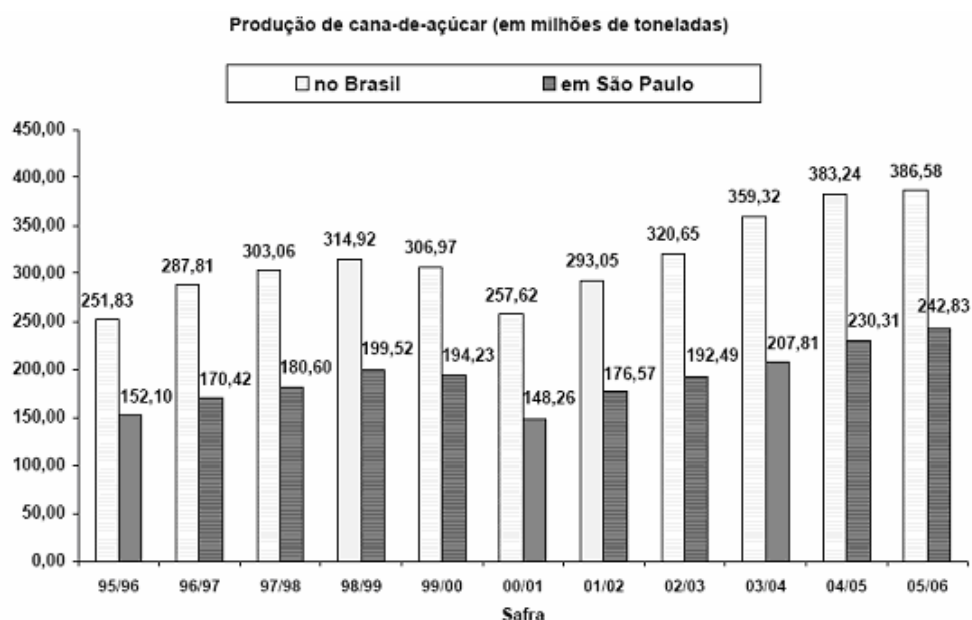


Figura II-4 Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil e em São Paulo

Fonte: Única, 2006

Em pesquisa feita pela ÚNICA (2006) foram analisados, entre outros fatores, a quantidade de bagaço de cana e o destino dado atualmente para o mesmo por algumas usinas de cana-de-açúcar de São Paulo. A Tabela II-3 apresenta os dados obtidos. Foi constatado que apesar de existir uma grande geração de bagaço de cana este não está sendo utilizado.

Tabela II-3 Utilização e destinação da biomassa de cana-de-açúcar nas usinas pesquisadas

| Usina | Produção na safra 2005 / 2006 (1000 ton) | Biomassa utilizada na geração de energia elétrica | Destinação dada ao bagaço da cana de açúcar |
|-------|--|---|--|
| A | 431 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| B | 611 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| C | 785 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| D | 802 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| E | 826 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| F | 1.137 | Palhiço e bagaço | Queima e venda do excedente |
| G | 1379 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| H | 1.403 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| I | 1.438 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| J | 1.658 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| K | 2262 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| L | 2.286 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| M | 2.408 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| N | 2.582 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| O | 2.882 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| P | 3.134 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| Q | 3.166 | Palhiço e bagaço | Apenas a queima |
| R | 3.308 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| S | 3.555 | Palhiço e bagaço | Apenas a queima |
| T | 3.910 | Apenas bagaço | Apenas a queima |
| U | 5.337 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |
| V | 7.133 | Apenas bagaço | Queima e venda do excedente |

Fonte: Única, 2006

Um fator que dificulta as análises econômicas de utilização do bagaço de cana é a alta volatilidade do preço de venda. Segundo Batista (2007), o preço do bagaço de cana que chegou a custar 25 R\$/t durante o ano de 2006, apresentou um valor mínimo de 5 R\$/t no ano de 2007. Tal disparidade nos preços pode ser justificada tanto pela sazonalidade inerente aos produtos agrícolas. A Figura II-5 ilustra a flutuação do preço do bagaço de cana vendido pela indústria Galo Bravo, localizada em Ribeirão Preto de março de 2000 a fevereiro de 2003.

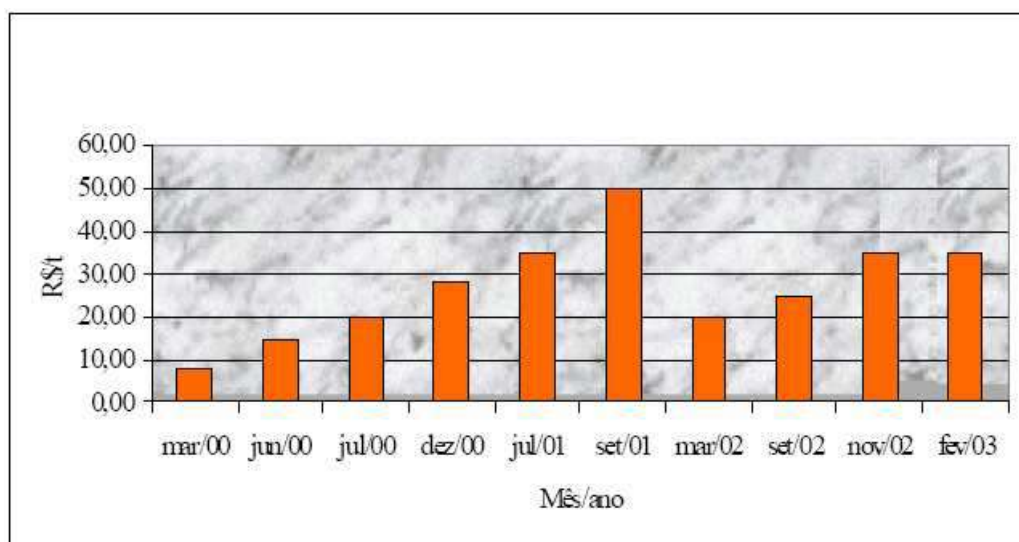


Figura II-5 Preço do bagaço de cana, usina Galo Bravo.

Fonte: Souza (2003).

Para o presente estudo foram considerados os seguintes valores para as propriedades do bagaço de cana: densidade energética de 18,1 GJ/t e densidade de 143,16 kg/m³.

II.4.2 Produção de eucalipto

Introduzido no Brasil pela indústria de papel e celulose há mais de um século, o eucalipto teve grande adaptação ao clima e solo da região sudeste. Possui rápido crescimento e seu uso como matéria-prima industrial já é uma técnica bastante conhecida e dominada. A área cultivada com florestas no Brasil chegou a 1,3 milhões de hectares em 2007, sendo 79% (Bracelpa, 2008) destes de eucalipto. Seu potencial econômico e financeiro pode ser observado pelos produtos obtidos de tais plantações ilustrados na Tabela II-4.

Tabela II-4 Quantidade dos produtos florestais oriundos de plantações de eucalipto em 2000

| Produto | Quantidade (t) | Produto | Quantidade (t) |
|----------------------|------------------|-----------------|----------------|
| Celulose fibra curta | 6.265.569 | Madeira serrada | 329.375 |
| Carvão | 6.976.375 | Aglomerado | 116.688 |
| Chapa de fibra | 327.250 | Outros | 175.151 |

Fonte: SBS, 2000.

Fonte: Bracelpa,2008

A Tabela II-5 mostra a produção florestal por estado de cada espécie vegetal utilizada cultivada, nela pode se perceber que São Paulo é o maior produtor de eucalipto do Brasil, seguido de perto pela Bahia.

Tabela II-5 Produção Florestal por estado

| ÁREA TOTAL REFLORESTADA EXISTENTE EM 31/12/2006 (Em ha) | | | | | | |
|--|--------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| Gênero | | | | | | |
| Estado | Eucaliptos | Pinus | Araucária | Acácia | Outros | Total |
| Amapá | 55.780,0 | 15.296,0 | - | 2.843,0 | 3.653,3 | 77.572,3 |
| Bahia | 337.849,9 | 2.322,7 | - | - | - | 340.172,6 |
| Espírito Santo | 130.459,2 | 8,9 | - | - | - | 130.468,1 |
| Maranhão | 469,0 | - | - | - | - | 469,0 |
| Mato Grosso do Sul | 90.586,6 | - | - | - | - | 90.586,6 |
| Minas Gerais | 172.288,9 | 2.770,8 | - | - | 1.717,0 | 176.776,7 |
| Pará | 46.042,7 | 101,0 | - | - | 642,3 | 46.786,0 |
| Paraná | 46.831,3 | 174.281,9 | 4.247,6 | - | 11,4 | 225.372,2 |
| Rio de Janeiro | 1.616,0 | - | - | - | - | 1.616,0 |
| Rio Grande do Sul | 85.244,4 | 8.378,3 | 592,3 | 2,5 | 36,2 | 94.253,7 |
| Santa Catarina | 7.708,0 | 102.254,6 | 129,1 | - | 15,3 | 110.107,0 |
| São Paulo | 345.605,7 | 38.312,4 | 66,3 | - | 56,3 | 384.040,7 |
| Total | 1.320.481,7 | 343.726,6 | 5.035,3 | 2.845,5 | 6.131,8 | 1.678.220,9 |

Fonte: Bracelpa,2006

Além disso, a tecnologia de produção de eucalipto no Brasil encontra-se muito desenvolvida. O tempo de rotação (necessário para o crescimento da árvore) é o menor do mundo, com uma produtividade bastante superior a média por hectare de outros países, conforme a Tabela II-6

Tabela II-6 Comparação do cultivo de eucalipto entre Brasil e o resto do mundo

| Espécies | Países | Rotação (anos) | Rendimento m³/ha ano |
|-----------------|---------------|-----------------------|--|
| Eucalipto | Brasil | 7 | 41 |
| Eucalipto | África do Sul | 8-10 | 20 |
| Eucalipto | Chile | 10-12 | 30 |
| Eucalipto | Portugal | 12-15 | 12 |
| Eucalipto | Espanha | 12-15 | 10 |

Fonte: Bracelpa, 2008

II.5 Conclusão

A utilização de matérias-primas biomássicas para geração de energia é uma alternativa viável tecnicamente e que necessita ser mais explorada. Divididas em matérias-primas herbáceas e lenhosas, têm como principal diferença a necessidade de pré-tratamento por pirólise para as herbáceas e de secagem para as lenhosas. Apesar das vantagens e desvantagens de cada uma das matérias-primas, as duas são apropriadas para utilização no processo BTL.

Apesar de algumas propriedades das biomassas dificultarem sua utilização, em comparação ao gás natural e ao carvão, como o poder calorífico e custos com transporte, sua utilização em processos industriais se justifica pelo seu baixo preço e disponibilidade.

O presente trabalho considera a localização da planta no estado de São Paulo, por sua importância no cenário industrial, pela sua localização central próxima aos grandes pólos consumidores de diesel, e proximidade em relação aos produtores de biomassa considerados, bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto proveniente de floresta cultivada. A fim de facilitar os cálculos com o custo de transporte foi considerado que a

planta se localiza no centro do estado de São Paulo e que todos os fornecedores de matéria-prima encontram-se a um raio máximo de 250 km.

A adaptação do eucalipto às condições de cultivo no estado de São Paulo e o grande número de usinas de álcool é outro motivo a justificar a escolha do estado para implementação da planta.

Capítulo III. Gaseificação e Síntese Fischer-Tropsch

A síntese Fischer-Tropsch, é uma tecnologia conhecida desde 1925, descoberta pelos cientistas alemães Franz Fischer e Dr. Hanz Tropsch, que consiste em converter gás de síntese em hidrocarbonetos líquidos. Inicialmente o insumo utilizado era o carvão, devido as grandes reservas alemãs.

A tecnologia sempre teve seu desenvolvimento acompanhado por uma série de questões políticas. Primeiro na Alemanha nazista e mais adiante durante o Apartheid na África do Sul, isto porque durante estes períodos estes países sofreram embargos comerciais que incluíam o fornecimento de petróleo. Com grandes reservas de carvão e devido sua alta dependência a importação de petróleo, o desenvolvimento da tecnologia de síntese de combustíveis era a saída viável.

Com o fim do embargo houve uma perda de interesse na tecnologia, principalmente na Alemanha, devido à concorrência com os combustíveis convencionais.

Com a crise do petróleo na década de 70, aconteceu uma nova onda de interesse pela tecnologia. Tanto os EUA, quanto a União Européia investiram em pesquisas na área de catálise, cinética, mecanismos de reação e desativação de catalisadores.

Durante a década de 90 a grande oferta de gás natural, e legislações regulamentando sua emissão fizeram com que fossem desenvolvidos projetos de utilização deste como insumo da síntese Fischer-Tropsch. O processo ficou conhecido como GTL (gás-to-liquid) e ao contrário do processo com carvão, conhecido agora como CTL (coal-to-liquid) não necessita do uso de gaseificadores.

O uso de biomassa para o processo, só recentemente entrou no foco das pesquisas mundiais sua principal diferença e desafios para seu desenvolvimento ocorrem na etapa de gaseificação da biomassa. Necessitando de desenvolvimento de gaseificadores específicos para este fim.

III.1 Gaseificação

O processo de gaseificação consiste em transformar material orgânico em CO e H₂ (gás de síntese), através de sua decomposição térmica. Pode ser dividido em etapas, são

estas: pirólise, oxidação de parte do carbono fixo, gaseificação e craqueamento do alcatrão. (Cenbio, 2002).

Os equipamentos utilizados para este processo são chamados de gaseificadores. São classificados em: gaseificadores de leito fixo, de leito fluidizado e de leito arrastado. Podem ser de aquecimento direto ou indireto e utilizar oxigênio puro, vapor ou ar para formação de atmosfera redutora. O gás de síntese para utilização da síntese Fischer-Tropsch deve atender a especificações de pureza e composição, para evitar envenenamento do catalisador e otimizar a eficiência do processo, respectivamente. A Tabela III-1 mostra os principais parâmetros a serem atendidos pelo gás de síntese produzido.

Tabela III-1 Especificações do gás de síntese para utilização no processo Fischer-Tropsch

| Componentes | FT-Síntese especificações |
|---|----------------------------------|
| Razão H₂/C | 1.35-2 |
| Inerte (%) | <10 |
| Particulados mg/m³ | 0.1 |
| Alcatrão mg/Nm³ | <1ppmV |
| Halogeneos mg/Nm³ | <10ppbV |
| Alcalis mg/Nm³ Na+K | <0.010= \leq 10ppbV |
| S-comp mg/Nm³ | <0.150 |
| N-comp mg/Nm³ | <0.015 |
| Metano | <2% |

Fonte: Adaptado de Opdal et al., 2006

III.1.1 Reações envolvidas

As reações que ocorrem no processo de gaseificação são complexas e não completamente esclarecidas, ocorrem de maneira simultânea em diferentes áreas do gaseificador (Cenbio, 2002). As principais reações do processo serão apresentadas a seguir:

I. Pirólise



II. Oxidação do Carbono

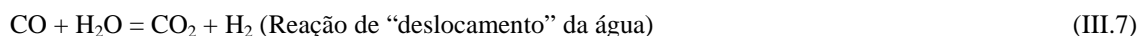


III. Gaseificação

- Reações Heterogêneas



- Reações Homogêneas



IV. Craqueamento do Alcatrão



V. Oxidação Parcial dos Produtos da Pirólise



Fonte: Cenbio,2002

Algumas considerações podem ser feitas a respeito das reações acima, a adição de água ao ar de gaseificação, até 30% aumenta o conteúdo de hidrogênio e de monóxido de carbono no gás produzido, como demonstrado nas equações III.5, III.7 e III.8. O aumento da pressão favorece a formação de metano (equação III.6). Uma forma de aumentar a eficiência do processo é utilizar oxigênio puro ao invés de ar, com isso diminuem-se as perdas de energia associadas a presença de gases inertes (Cenbio, 2002).

III.1.2 Principais Tipos de gaseificadores

Uma forma de se classificar os diferentes tipos de gaseificadores utilizados para a gaseificação de biomassa é pelo leito utilizado, podendo ser fixo, fluidizado ou arrastado.

III.1.2.1 Gaseificadores de leito Fixo

Os gaseificadores de leito fixo podem ser divididos em dois subgrupos em função da circulação dos gases, são eles: contracorrente e co-corrente. Com essa diferença na alimentação as diferentes zonas criadas em seu interior ficam localizadas de maneira diferentes. Essas diferenças podem ser visualizadas na Figura III-1.

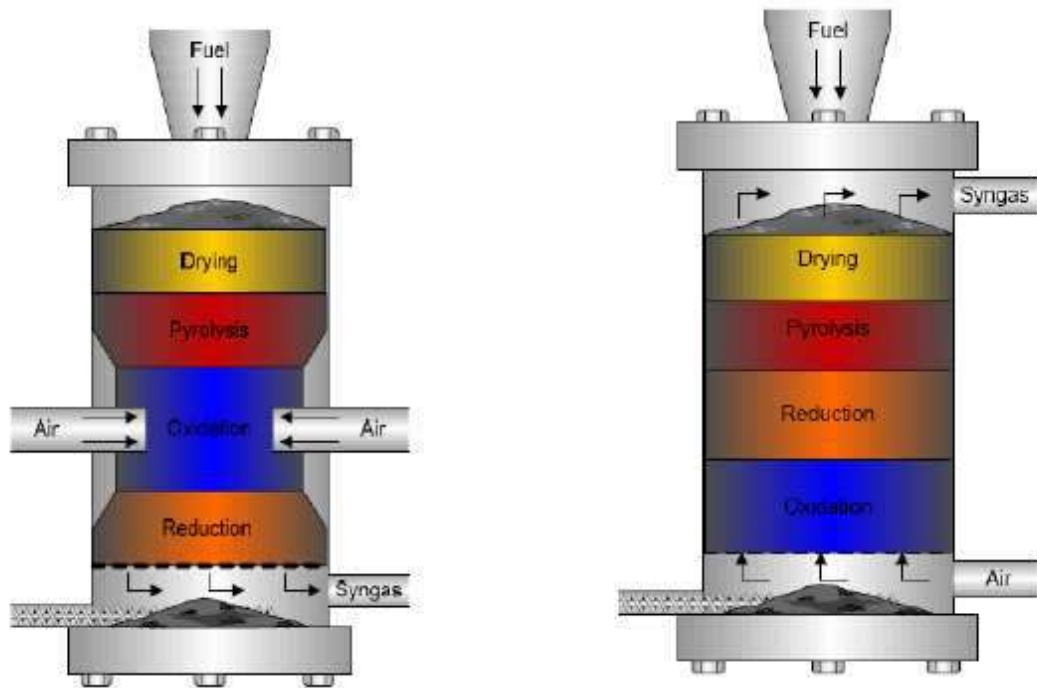


Figura III-1 Gaseificadores em co-corrente a direita, e contracorrente a esquerda

Fonte: Opdal et al., 2006

Os gaseificadores contracorrente foram pioneiros na gaseificação, e têm o projeto mais simples existente, foram utilizados inicialmente para a gaseificação de carvão mineral. Nele o combustível é alimentado pelo topo e desce em contra corrente ao ar introduzido pela grelha. Nestes gaseificadores as camadas de carvão vegetal apoiadas na grelha entram em combustão intensa, gerando CO_2 e H_2O sob temperaturas elevadas, ao passarem pela camada descendente de carvão sofrem redução e se convertem a CO e H_2 , resfriando a temperaturas por volta de 750°C . Abaixo desta temperatura as taxas de reação sofrem drástica redução, praticamente cessando. Apesar disso os gases, ao subirem pelo gaseificador continuam a trocar calor com a corrente de sólidos, e promovendo sua pirólise. Os gases saem pelo topo do gaseificador, resfriados e com a matéria volátil e a umidade liberadas pelo combustível sólido durante a pirólise (Cenbio, 2002).

Já nos gaseificadores em co-corrente, devido sua configuração, o agente oxidante (ar) entra primeiro em contato com a biomassa não queimada, e a temperatura máxima do sistema se dá na região de pirólise flamenjante na fase gasosa ao invés da fase sólida (caso do gaseificador em contracorrente). Isso faz com que a biomassa que está nas camadas superiores do gaseificador passe por um processo de preaquecimento e secagem. Conforme a biomassa atinge temperaturas mais elevadas, superiores a 200°C, ocorre a liberação de gases combustíveis que levam a formação de uma chama ao redor das partículas, que passam a queimar mais intensamente até o esgotamento dos gases combustíveis, restando 5-15% de carvão vegetal. O gás rico e aquecido gerado nesta região reage ao entrar em contato com o carvão vegetal gerando mais CO e H₂. Pela natureza endotérmica das reações que ocorrem nesta região a temperatura cai abaixo de 700°C provocando o congelamento das reações de gaseificação. (Cenbio, 2002)

A Tabela III-2 indica as principais vantagens e desvantagens destes gaseificadores

Tabela III-2 Comparação entre gaseificadores de leito fixo

| Gaseificador | Vantagens | Desvantagens |
|-----------------------|--|---|
| Contracorrente | <ul style="list-style-type: none"> • Simplicidade de operação. • Capacidade de gaseificar materiais com elevado teor de água • Potencial para operar sob temperaturas muito elevadas | <ul style="list-style-type: none"> • Gás gerado possui grande teor de alcatrão (10-20%) que necessitará ser removido. • Granulometria do material combustível deve ser uniforme para diminuir perda de carga. |
| Co-corrente | <ul style="list-style-type: none"> • Materiais Orgânicos ficam retidos na matriz de carvão e a cinzas, que podem ser retirados pelo fundo, diminuindo a quantidade de material particulado • Consomem de 99 a 99,9% do alcatrão. | <ul style="list-style-type: none"> • A matéria-prima tem que apresentar baixa umidade e granulometria uniforme • O gás sai do gaseificador a altas temperatura, levando a perda de energia caso não haja aproveitamento energético. |

Fonte: Adaptado de Cenbio, 2002

III.1.2.2 Gaseificadores de leito Fluidizado

Estes gaseificadores, assim como a maioria, foram inicialmente desenvolvidos para a gaseificação de carvão mineral em larga escala, porém vem sendo considerados uma boa alternativa para a gaseificação de biomassa. O leito é geralmente composto de areia de quartzo e promove a troca de calor entre as partículas do combustível (Opdal et al., 2006). O princípio de leito fluidizado é que fazendo-se um fluido circular por um leito sólido, em velocidade suficiente para sua fluidização, dificulta-se o surgimento de gradientes de temperatura, pontos muito ativos ou regiões estagnadas. A fluidização ocorre quando o fluido é inserido em velocidade suficiente para que haja a reordenação das partículas sólidas e que estas percam contato entre si passando a se comportar como um fluido.

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser divididos em dois grupos de acordo com a velocidade do agente fluidizador, são eles: Leito fluidizado circulante e Leito fluidizado borbulhante, a Figura III-2 mostra a configuração de cada um destes gaseificadores. Ao se aumentar gradativamente a velocidade do fluido, primeiro se verifica a presença de bolhas, caracterizando o leito fluidizado borbulhante, o aumento contínuo da velocidade do fluido faz com que este pare de formar bolhas e passe a circular pelo corpo do gaseificador.

A combustão de biomassa nestes tipos de gaseificadores vem sendo largamente utilizada devido ao fato de conseguir operar com combustível com umidade elevada, até 65%, e com granulação entre 5 e 10 cm. (Cenbio, 2002).

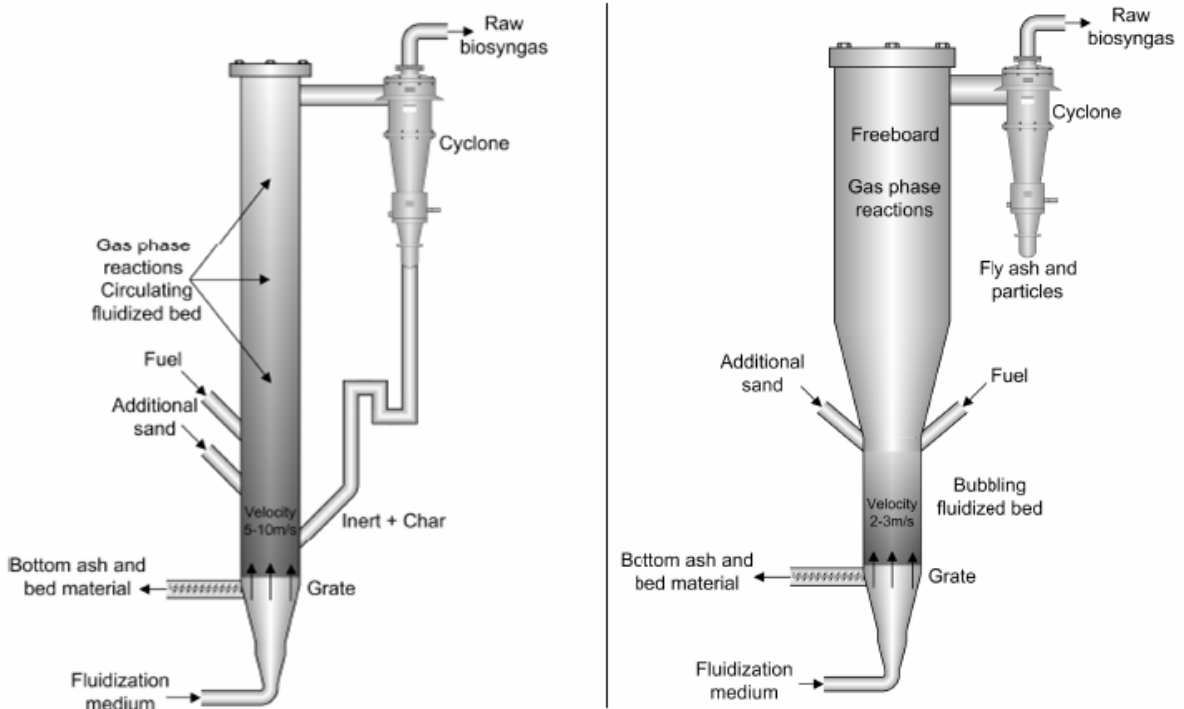


Figura III-2 Gaseificadores de leito fluidizado, Leito fluidizado circulante a esquerda e leito fluidizado borbulhante a direita

Fonte: Opdal et al., 2006

Podem operar com pressões maiores que a atmosférica, porém é um processo complicado que exige sistemas de comportas, alimentação por roscas e sistemas de selagem especiais. Operações em pressões na ordem de 10 a 20 bar apresentam grandes vantagens entre elas o fato de que turbinas a gás e processos de síntese normalmente utilizam gases a pressões elevadas, outra vantagem é que com o aumento da pressão a capacidade do gaseificador também aumenta (Cenbio, 2002).

Para o uso no processo Fischer-Tropsch o gás gerado necessita de purificação prévia já que este tipo de gaseificador gera gás com elevado teor de material particulado, e a razão CO/H₂ encontra-se abaixo do especificado para a síntese Fischer-Tropsch. (Opdal et al., 2006).

III.1.2.3 Gaseificadores de leito arrastado

Diferentemente dos outros gaseificadores apresentados nos gaseificadores de leito arrastado a biomassa é diretamente alimentada na zona de gaseificação. A biomassa é alimentada misturada com o ar pelo topo do gaseificador.

O gás produzido por este tipo de gaseificador é praticamente livre de alcatrão, porém é necessário que a biomassa passe por pré-tratamento como secagem e/ou pirólise. Além disso, uma desvantagem deste tipo de gaseificador é que grande parte da energia é convertida em calor.

III.2 Síntese Fischer-Tropsch

A unidade de síntese Fischer-Tropsch é o coração do processo BTL, é nesta unidade que o gás de síntese será transformado em hidrocarbonetos líquidos, e após tratamentos posteriores em combustíveis líquidos.

O gás de síntese gerado pelos gaseificadores sofre diversos processos de purificação até que possa ser utilizados para síntese. Isto se deve ao fato que para eficiência da síntese ser satisfatória a razão H₂/CO deve ser da ordem de 2. Além disso o fato de se utilizar catalisadores faz com que sejam necessários cuidados com compostos que possam causar seu envenenamento.

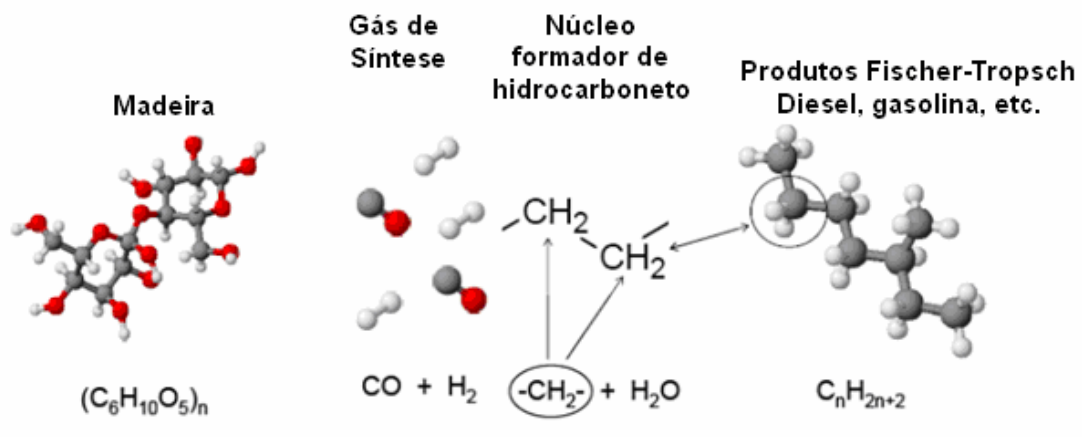
III.2.1 Reações

A química básica da síntese Fischer-Tropsch pode ser descrita com as equações adaptadas de Opdal et al. (2006):



As reações III.11 e III.14 (reação de metanização e de boudouard) são indesejáveis isto porque não produzem hidrocarbonetos líquidos. A reação III.12 é a reação dominante quando se utiliza catalisador de base cobáltica. Quando se utiliza catalisadores a base de ferro a reação III.13 também ocorre. Por serem reações altamente exotérmicas, deve se tomar cuidado com a geração de calor durante a síntese, pois além de provocar sobre aquecimento e danos ao catalisador, o aumento da temperatura favorece a reação III.11 em detrimento da reação III.12 . (Opdal et al., 2006).

As reações ocorrem sob a superfície do catalisador e o mecanismo pode ser visualizado na Figura III-3. Primeiro ocorre a adsorção do CO sobre a superfície do catalisador, em seguida, após a formação do radical metil por dissociação do CO e do hidrogênio, tem início a polimerização por condensação, onde a ocorre a adição de CO e H₂ e liberação de água. Ocorre então a terminação da cadeia e a dessorção do produto da superfície do catalisador.



Gaseificação

Síntese

Figura III-3 Gaseificação da biomassa e síntese de Fischer-Tropsch

Fonte: Opdal et al., 2006

III.2.2 Reatores

Os principais desafios para o desenvolvimento de reatores comerciais de Fischer-Tropsch são o alto calor de reação (necessitando de mecanismos de controle de temperatura) e o grande número de produtos gerados com diferentes pressões de vapor (Opdal et al., 2006). Os principais tipos de reatores são: Reator tubular de leito fixo, Reator de Leito Fluidizado e Reator em lama.

III.2.2.1 Reator Tubular de Leito Fixo

Este tipo de reator é composto de centenas de tubos estreitos envoltos por água, onde a água funciona como controlador de temperatura evaporando-se e sendo liberada conforme a pressão aumenta. Apesar de ser um projeto relativamente simples a sua construção em escala comercial é cara por necessitar de um grande número de tubos. Os

catalisadores a Ferro não são recomendados por sua baixa estabilidade. (Rodrigues et al., 2004).

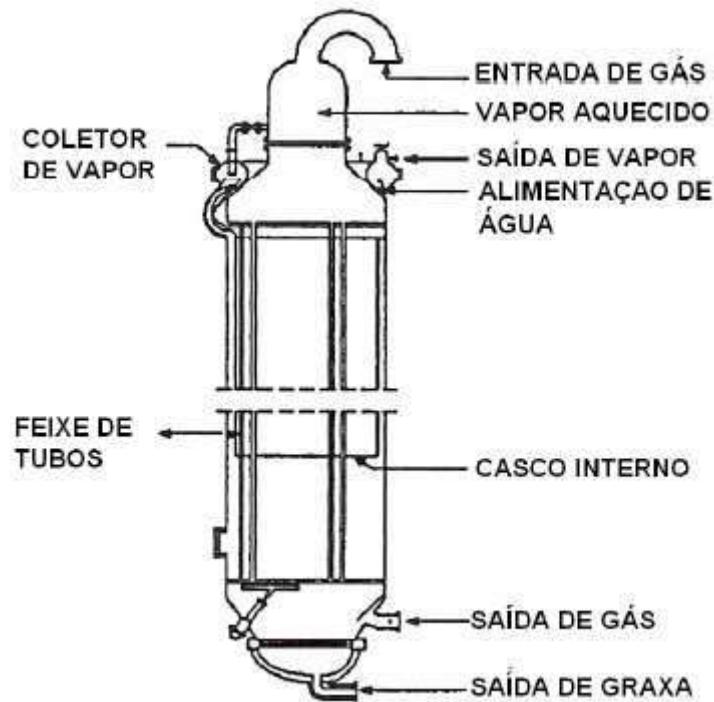


Figura III-4 Reator tubular de leito fixo para síntese Fischer-Tropsch

Fonte : Adaptado de Opdal et al., 2006

III.2.2.2 Reator de Leito Fluidizado

Nestes reatores o catalisador se encontra suspenso no leito fluidizado, fazendo com que seu consumo seja menor que os de reatores de leito fixo. Sua configuração pode ser descrita como um vaso com distribuidores de gás e tubos trocadores de calor (Opdal et al., 2006). São operados em altas temperaturas e médias pressões foram desenvolvidos para a produção de olefinas leves e componentes da gasolina. Tem como principais características, a melhor remoção de calor e por conseqüente melhor controle de temperatura, menos problemas com queda de pressão e maior facilidade de remoção e adição de catalisador, podendo ser feita inclusive sem interrupção do processo (Rodrigues et al., 2004). A Figura III-5 mostra a configuração destes tipos de reatores.

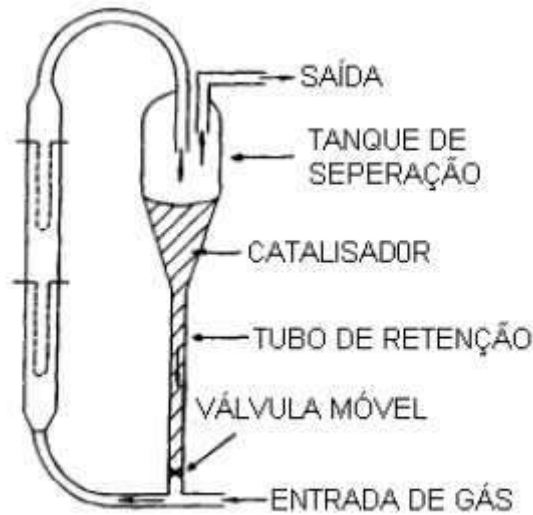


Figura III-5 Reatores de leito fluidizado para a síntese Fischer-Tropsch
 Fonte : Adaptado de Opdal et al., 2006

III.2.2.3 Reator de Leito em Lama

É o reator mais recentemente desenvolvido e o mais usado em novas plantas Fischer-Tropsch. A reação ocorre em baixas temperaturas (200-250°C) e baixas pressões (20-30 bar), e as partículas do catalisador encontram-se suspensas na lama. Neste reator o gás de síntese quente é borbulhado na lama líquida que é constituída por produtos da reação (Hidrocarbonetos em forma de graxa). (Rodrigues et al.,2004).

A configuração deste reator favorece a transferência de calor, o controle da temperatura e a fácil adição e remoção de catalisador. Sua simplicidade no design torna a sua construção simples e possui uma grande capacidade de produção. (Rodrigues et al.,2004).

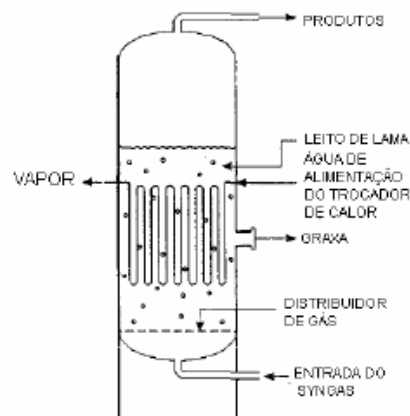


Figura III-6 Reator de leito em lama para a síntese Fischer-Tropsch
 Fonte: Opdal et al., 2006

III.2.3 Produtos gerados

O produto gerado na síntese Fischer-Tropsch é um óleo sintético, que assim como o petróleo, é constituído de uma mistura de hidrocarbonetos de peso molecular variável. Para que se possa separar estes produtos é necessário fazer um refino deste óleo. Após este processo são obtidos diversos produtos como diesel, nafta, solventes e etc., a Figura III-7 mostra o percentual de cada um destes produtos para uma planta Fischer-Tropsch tradicional.

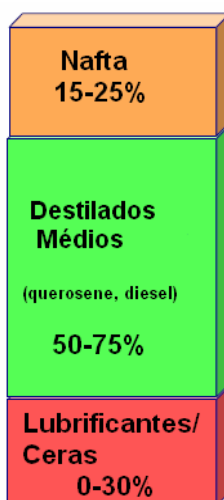


Figura III-7 Composição típica do produto da síntese Fischer-Tropsch

Fonte: Kavalov et al., 2005

Uma forma de aumentar a produção de diesel é quebrando-se as ceras em hidrocarbonetos menores e fazer um reciclo de parte dos hidrocarbonetos líquidos para o gaseificador (Kavalov et al., 2005). Porém de acordo com Kavalov et al. (2005), um aumento superior a 75% pode causar perda de energia no processo, maior emissão de poluentes e aumento nos custos.

O diesel produzido pelo processo Fischer-Tropsch tem alto padrão de qualidade, e ao contrário do diesel convencional não apresenta enxofre que pode causar corrosão em motores. Além disso, tem elevado número de cetano, podendo assim ser usado como aditivo de diesel convencional de qualidade inferior. (Opdal et al., 2006)

Capítulo IV. Estado da Arte e Análise Tecnológica

Apesar de a tecnologia Fischer-Tropsch já ser bastante difundida no mundo usando como matéria-prima carvão mineral e gás natural, o uso de biomassa para este tipo de síntese está em seus estágios iniciais, atualmente não existe nenhuma planta em escala comercial de produção.

Apesar da fase inicial de desenvolvimento da tecnologia, alguns projetos já foram iniciados, a maioria ainda em escala laboratorial. Existem no momento quatro linhas principais de pesquisa, são elas:

- Gaseificação centralizada em leito arrastado para síntese de diesel (cEF-D, do inglês, centralized Entrained Flow - Diesel) – como o nome indica esta linha de projeto tem como princípio fazer todo o processo BTL, da gaseificação da biomassa a síntese Fischer-Tropsch, no mesmo local, utiliza o gaseificador em leito arrastado, e seu produto principal é o diesel. A principal representante desta linha de pesquisa é a empresa alemã Choren, que inclusive já possui duas plantas de demonstração instaladas.
- Gaseificação descentralizada em leito arrastado para síntese de diesel (dEF-D, do inglês, centralized Entrained Flow - Diesel) – A diferença desta linha de pesquisa para anterior é que ao invés de se transportar toda a matéria-prima para a fábrica, esta passa por pirólise em unidades descentralizadas próximas das unidades geradoras de matéria-prima. Seu principal representante é o instituto Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), localizado em Karlsruhe, na Alemanha.
- Gaseificação em leito fluidizado circulante para síntese de diesel (CFB-D, do inglês, Circulating fluidized bed – Diesel)– utiliza gaseificador de leito fluidizado circulante para a síntese de diesel. O principal representante desta linha de pesquisa é o instituto CUTEC.
- Gaseificação interna em leito fluidizado circulante para a síntese de diesel (ICFB-D, do inglês, internal circulation fluidized bed gasification – Diesel) – este conceito considera a geração não somente de diesel. Propõe uma geração integrada de calor e energia elétrica para abastecimento de um distrito e é

concebido para operar em pequenas escalas. Diversos institutos estão avançando neste conceito são eles: Technische Universität Wien (TUV), Repotec (RPT) e Biomassekraftwerk Güssing (BKG).

IV.1 Gaseificação em leito fluidizado circulante para síntese de diesel, cEF-D

O grande diferencial do projeto desenvolvido pela Choren é o seu gaseificador Carbo-V®. Este gaseificador consegue converter várias matérias-primas (lenhosas e herbáceas) em gás de síntese livre de alcatrão. Seu projeto tem uma grande integração energética resultando em uma alta eficiência na conversão de biomassa em diesel. A Figura IV-1 mostra o fluxograma do processo utilizado.

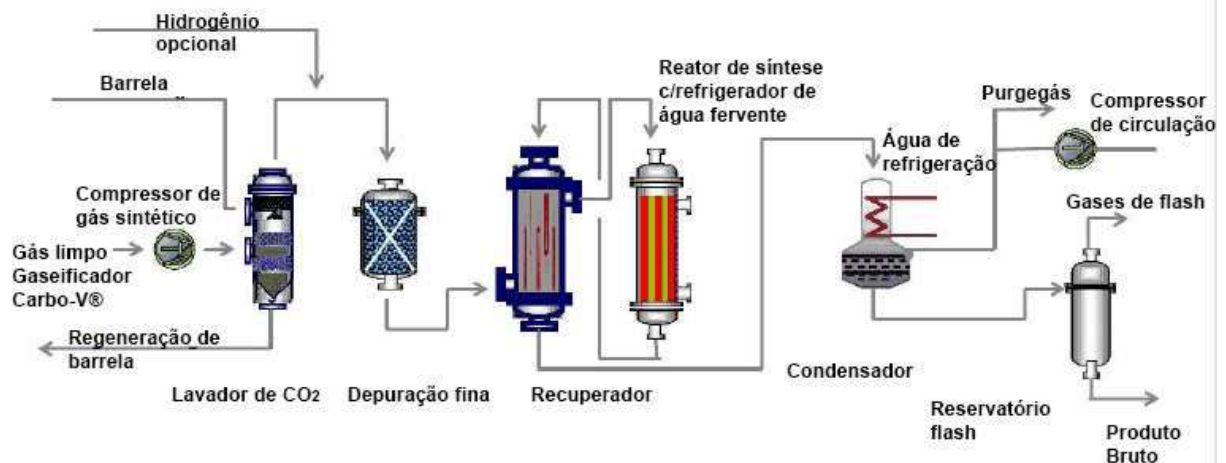


Figura IV-1 Processo BTL da Choren

Fonte: Adaptado de Choren,2008

Duas plantas já se encontram instaladas em Freiberg na Alemanha, a primeira, conhecida como planta- α e capacidade de receber 1MW de biomassa por dia foi desenvolvida e construída em 1997, nesta planta foram realizados testes para diversos tipos de biomassa. Inicialmente o principal produto era o metanol, até que em 2005, foi convertida para a produção de diesel pela síntese Fischer-Tropsch, esta planta já está em operação por mais de 10.000 horas.

O passo seguinte foi a construção de uma planta de demonstração de maior escala com capacidade de processar 45 MW de biomassa por dia, planta- β , concluída em abril de 2008, e já estão sendo realizando testes para sua partida.

O próximo passo na estratégia da Choren de produção de diesel em escala comercial é a construção de uma planta com capacidade de processar 1 milhão de toneladas de biomassa seca por dia, planta-Σ. Esta planta já se encontra na etapa de scale-up de alguns equipamentos, e estão estudando sua melhor localização. A fase de comissionamento está prevista para 2011.

IV.1.1 Descrição do processo

A biomassa sofre o processo de secagem através de utilização de ar quente (100°C), o aquecimento deste gás é feito pela utilização do calor gerado em outras partes do processo, e segue para a gaseificação.

O processo de gaseificação da Choren pode ser dividido em três etapas: gaseificação a baixa temperatura, gaseificação a alta temperatura e gaseificação em leito arrastado. Como indicado na Figura IV-2.

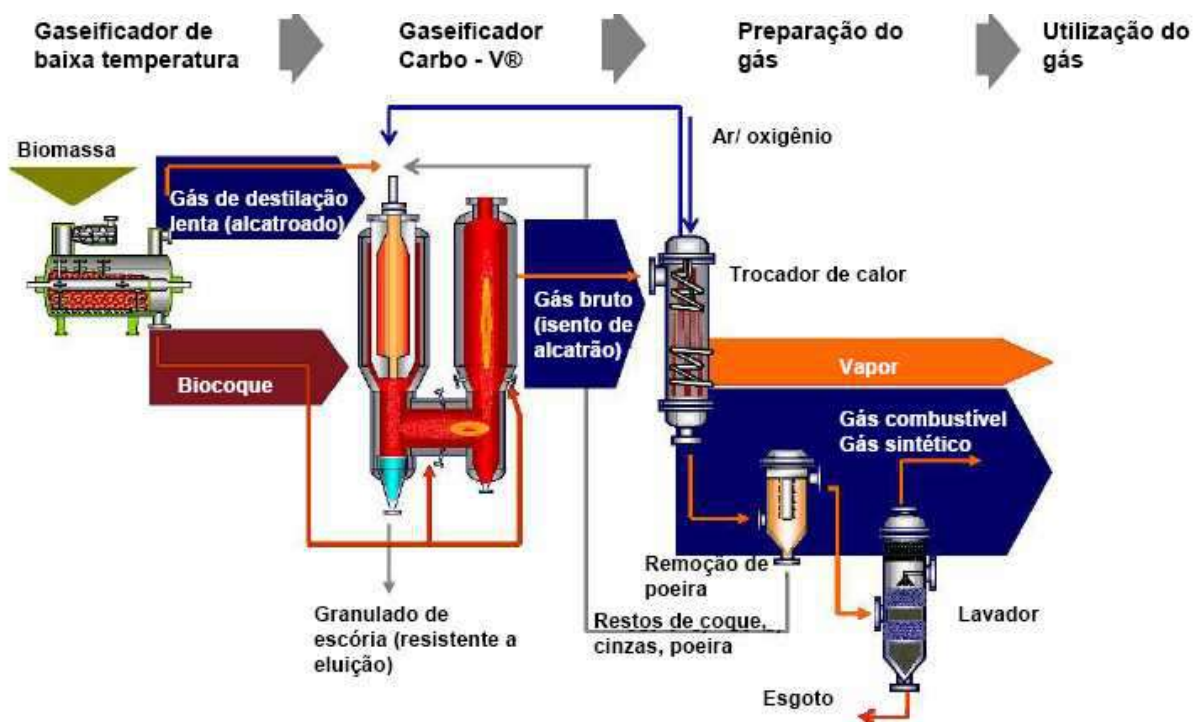


Figura IV-2 Processo de gaseificação e purificação da Choren
Choren, 2008

A biomassa após sofrer a etapa de secagem (teor de água de 15-20%) é enviada a gaseificação em baixas temperaturas (400-500°C) para sofrer carbonização por sua oxidação parcial, sendo assim decomposta em gás alcatroado e biocoque.

O gás alcatroado é então submetido à gaseificação a altas temperaturas (1400°C), onde é novamente oxidado com quantidade de ar e/ou oxigênio abaixo da razão estequiométrica em uma câmara de combustão. Na gaseificação no leito arrastado (800°C) o biocoque (que deve ser previamente moído, a fim de poder ser pulverizado pelo gaseificador) é insuflado junto com o ar e/ou oxigênio e é convertido em gás de síntese bruto. Que ao passar por trocador de calor para resfriamento, gera vapor que pode ser utilizado na geração de calor e/ou energia.

O gás de síntese bruto necessita ser purificado antes de ser utilizado na síntese Fischer-Tropsch, primeiro é realizada uma lavagem em *scrubber* a água em duas etapas, onde tem-se por objetivo retirar compostos de cloro e enxofre, além de material particulado.

Apesar da boa qualidade do gás resultante a razão H₂/CO necessita de ajustes, para isso utiliza-se um reator WGS (*Water-Gas-Shift*).

O CO₂ é retirado através de um processo comercial chamado de Selexol. E a purificação fina é feita através da adsorção química em coluna com ZnO, isto é necessário para resguardar o reator da síntese Fischer-Tropsch.

O gás de síntese segue então para unidades de condicionamento de gás, onde o hidrogênio é retirado para ser utilizado mais tarde nos processos de síntese e *upgrading*. Isto é feito nas unidades de reforma a vapor (SMR) e *pressure-swing-adsorption* (PSA).

O gás puro é então encaminhado para unidade de síntese Fischer-Tropsch, a Choren utiliza o processo da Shell, que já é bastante conhecido e já encontra implementado em diversas plantas. Os principais produtos gerados são hidrocarbonetos de longas cadeias parafínicas. Além do diesel, produto principal, são obtidos nafta e gasolina. O calor gerado devido a natureza exotérmica da reação é utilizada para a geração de vapor.

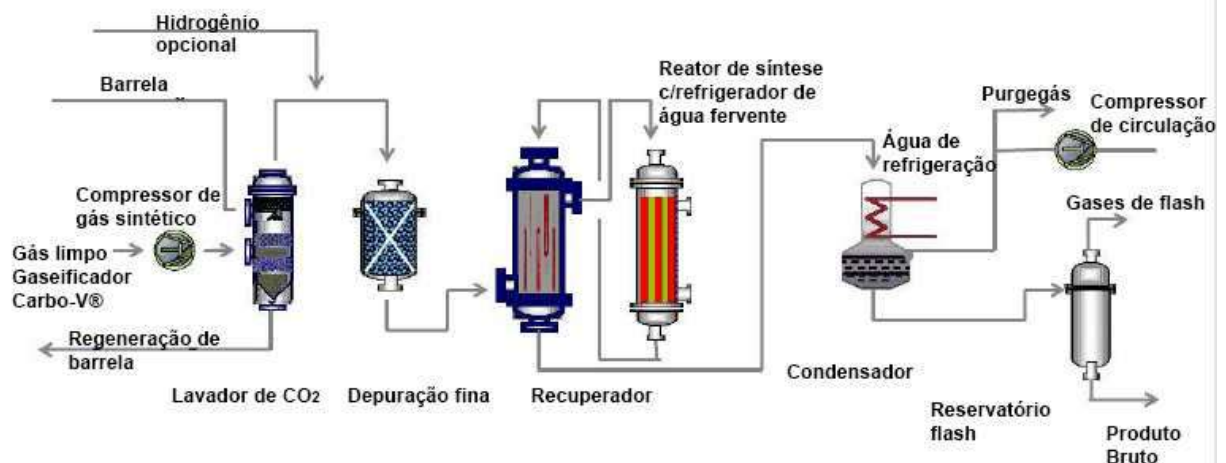


Figura IV-3 Esquema do processo de obtenção de diesel desenvolvido pela Choren

Fonte: Choren,2008

IV.2 Gaseificação descentralizada em leito arrastado para síntese de diesel, dEF-D

O grande diferencial do conceito desenvolvido pelo FZK é a utilização de plantas descentralizadas de pirólise rápida, assim a matéria-prima seria transformada a óleo de pirólise no seu local de produção. A intenção com isto é a diminuição com os custos de transporte para a planta central de gaseificação e síntese.

Após testes para a adaptação da pirólise rápida a diversos tipos de biomassa e em diferentes escalas, foram feitos experimentos de balanço térmico. Só então os primeiros testes com gaseificador de leito fluidizado em escala de bancada foram realizados.

Após estes testes iniciais foi construída uma planta de desenvolvimento de processo em Karlsruhe. Nesta planta o gaseificador utilizado foi o de leito arrastado, após vários testes de composição da lama, chegou-se a uma lama com teor de coque superior a 40% que ao ser utilizada em gaseificador de leito arrastado de 5 MW da Siemens, operando com oxigênio e em temperaturas entre 1200-1600°C e pressão de 26 bar, produziu um gás de síntese livre de alcatrão e com baixo teor de metano.

Baseados nestes testes nas unidades de pirólise e de gaseificação, foi planejada uma planta piloto com capacidade de processar 500 kg de biomassa por hora. A unidade de pirólise rápida encontra-se em construção, desde novembro de 2005. Os próximos

passos são a construção de plantas pilotos das unidades de gaseificação, purificação e síntese.

IV.2.1 Descrição do processo

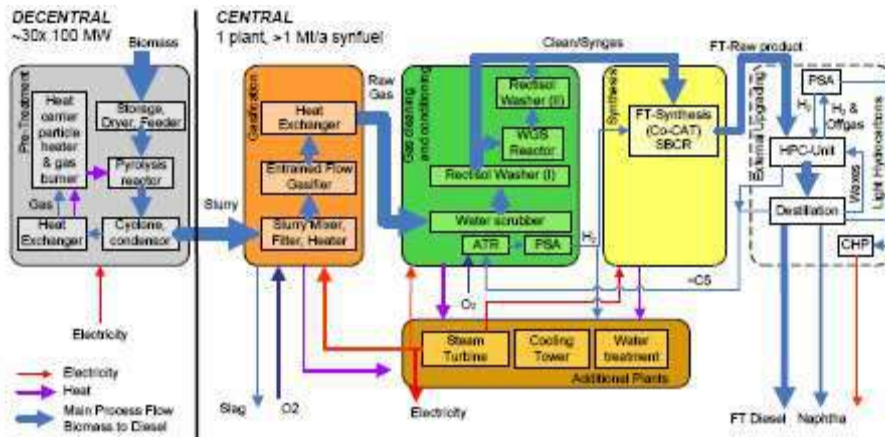


Figura IV-4 Esquema do processo de obtenção de diesel da FZK
 Fonte: Adaptado de Renew, 2008

A biomassa é primeiro destruída e colocada em um secador, em seguida é submetida a pirólise rápida em plantas descentralizadas ainda no seu local de produção. São plantas de pequena escala com capacidade de processar 100MW de biomassa. O reator utilizado para a pirólise rápida é o LR-Mixer da Lurgi-Ruhrigas), comercializado há mais de 50 anos.

Na pirólise as partículas de biomassa são aquecidas rapidamente a 500°C gerando gases e vapores resultantes da carbonização da biomassa e coque. Estes gases deixam o reator junto com um fino pó de coque. O coque é então separado da corrente de gás através de ciclones e os vapores são resfriados formando um óleo de pirólise. O gás remanescente é queimado para fornecer calor para o sistema. Os produtos gerados na pirólise (coque e óleo de pirólise) são misturados, formando uma pasta que pode ser então ser transportada. A vantagem disto é que esta pasta tem alta densidade, e poder calorífico 10 vezes maior do que a biomassa original, isso faz com que os custos de transporte e armazenagem sejam menores.

A lama pré-aquecida é alimentada juntamente com oxigênio na câmara pressurizada no gaseificador de leito arrastado fazendo então que ela se atomize e facilite a gaseificação. O gás de síntese gerado, livre de alcatrão é então lavado em *scrubber* a água para retirar as cinzas e o material particulado. O H₂S, COS e o CO₂ são

retirados através de uma unidade comercial conhecida por Rectisol. Assim como no processo da Choren a razão H_2/CO é ajustada através de uma unidade WGS. O CO_2 é então removido com uma segunda unidade Rectisol.

Os hidrocarbonetos leves, eventualmente produzidos são convertidos em CO e H_2 através da reforma autotérmica (ATR). O hidrogênio, assim como acontece no processo da Choren é separado por uma unidade PSA e usado na unidade de hidrocraqueamento onde o monóxido de carbono é reciclado para a unidade de WGS.

O gás de síntese é então encaminhado para o reator Fischer-Tropsch operando com um catalisador comercial para síntese de cadeias longas parafínicas e ceras. A cera é convertida a diesel por hidrocraqueamento, também são produzidos nafta e diversos produtos secundários.

IV.3 Gaseificação em leito fluidizado circulante para síntese de diesel, CFB-D

Diferentemente dos processos anteriores, este utiliza gaseificador de leito fluidizado circulante. O gaseificador desenvolvido pelo instituto CUTEC de 2005 a 2007, está em operação desde então. Ainda encontra-se em escala piloto e tem capacidade de processar 400kW de biomassa. Seu principal objetivo no momento é servir como equipamento para estudo com diferentes biomassas (madeira de salgueiro, resíduo de batata-doce, palha, raspa de semente de girassol e etc. Os resultados foram animadores, em todos os casos estudados apresentando razão de H_2/CO próxima a 2, e praticamente livres de alcatrão. Este resultado surpreendentemente alto, pode fazer com que não seja necessária a unidade de WGS.

Durante os testes em escala laboratorial, o processo de purificação é feito através de diversos equipamentos, são eles: filtro de gás a quente, sistema de *quenching*, dois *scrubbers* um a água e outro a biodiesel. Além disso, uma coluna de carvão ativado é usada para remoção de traços de gases com o H_2S . O sistema vem operando com bons resultados conseguindo remover os contaminantes a níveis próximos aos limites de detecção dos equipamentos. Este esforço para se retirar os contaminantes a níveis ínfimos é justificada devido ao fato de que o catalisador utilizado não tolerar contaminantes sulfurados.

O catalisador usado, especialmente desenvolvido para o processo foi testado com gás de síntese contendo CO_2 , observou-se que o único efeito provocado era o de diluição do gás de síntese, não havendo então a necessidade de remoção do CO_2 .

Testes de produção de diesel já foram realizados utilizando como matéria-prima salgueiro e palha.

Os próximos passos são primeiro a construção de unidades de purificação, síntese e *upgrading* em escala piloto. Para posteriormente se possa construir uma planta com escala comercial.

IV.3.1 Descrição do processo

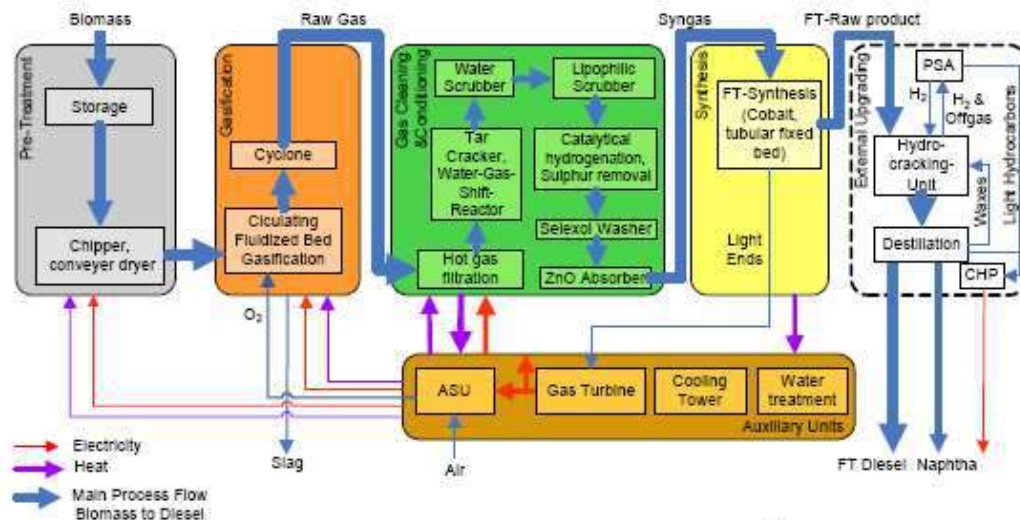


Figura IV-5 Esquema do processo de obtenção de diesel da CUTEC
 Fonte: Renew, 2008

Quando existe necessidade a biomassa é cortada em chips e sofre processo de secagem até que atinja um teor de 35% de umidade. A biomassa é então alimentada em um gaseificador de leito fluidizado circulante, operando sob pressão atmosférica a 850°C utilizando área com aditivos como material de leito. O gás que deixa o gaseificador carrega uma parte de material sólido (composto de material do leito e partículas de biomassa não gaseificadas), por isso passa por um ciclone onde este material sólido é removido e em seguida realimentado no gaseificador.

Para retirada do restante de material particulado que podem estar na corrente gasosa, são utilizados filtros cerâmicos em série. Os traços de alcatrão são retirados

através de um catalisador contido no reator da unidade WGS (lembrando que testes preliminares estão mostrando que talvez esta unidade não seja necessária).

O gás é então resfriado em trocador de calor, e impurezas como o H_2S e o NH_3 são removidas através da utilização de *scrubbers* a água e outro a óleo. O óleo retirado do *scrubber* a óleo é enviado ao gaseificador. Em unidade hidrogenadora, o sulfato de carbono é reduzido a CO e H_2S , e o H_2S é então separado em uma unidade de lavagem oxidativa. O CO_2 é separado utilizando-se um *scrubber* comercial o Selexol.

O moderno catalisador utilizado é colocado em um reator Fischer-Tropsch tubular de leito fixo operando a temperaturas entre 210-250°C. São formados então hidrocarbonetos parafínicos de cadeia longa, que são transferidos para uma refinaria comercial, para o processo de *upgrading*. O calor de reação e os hidrocarbonetos gasosos gerados na síntese Fischer-Tropsch são utilizados para a geração de calor e eletricidade.

IV.4 Gaseificação interna em leito fluidizado circulante para a síntese de diesel, ICFB-D

O conceito desta linha de pesquisa é o desenvolvimento de uma “central geradora de energia do futuro”, onde não somente diesel é produzido, mas também calor e energia elétrica. Apesar de serem projetos em escalas menores com o objetivo de suprir a necessidade de pequenos distritos, este tipo de projeto tem grande força política, por proporcionar o desenvolvimento regional. A eficiência geral deste tipo de projeto é estimada em cerca de 80%. Resultando na maior redução de emissões de CO_2 entre os processos analisados.

O conceito desenvolvido pelos institutos TUV, BKG e RPT é uma evolução de uma planta de calor e energia (CHP), instalada em Güssing, como capacidade processar de 8MW a 10MW de biomassa. Esta planta vem sendo operada desde 2001, e já acumula bastante progressos desde sua implementação. O gás produzido tem baixo teor de nitrogênio, alta razão H_2/CO (na ordem de 1,6-1,8).

Atualmente está sendo utilizada uma planta em escala de bancada, a fim de se ganhar experiência com o processo como um todo, e para a otimização de parâmetros de

síntese, tem capacidade de produzir 7Nm³/h e utiliza reator de lama operado a 25 bar. O diesel produzido nesta unidade tem excelente qualidade com alto número de cetano na ordem de 70 a 80.

Uma planta em escala piloto está atualmente em construção, ela será inserida em uma planta já existente CHP de biomassa, que terá capacidade para abastecer toda frota de veículos do distrito em que está instalada (Güssing).

IV.4.1 Descrição do processo

A biomassa é primeiramente cortada e seca, e encaminhada para um reator de leito fluidizado de circulação interna rápida (FICFB), o reator é dividido em duas zonas separadas, uma para a gaseificação operando a 850°C e outra a 950°C para a combustão. A biomassa entra na zona de gaseificação gerando vapores que saem desta zona carregando partículas do material do leito e coque para zona de combustão. Esta zona é fluidizada com os próprios vapores provenientes da gaseificação e o coque é queimado, por este motivo o gás de síntese gerado é praticamente livre de nitrogênio, já que não entra em contato direto com o ar.

O calor gerado pela reação ocorrida na zona de combustão é transferido a zona de gaseificação através da circulação do leito, este calor é utilizado para fornecer energia para a reação endotérmica de gaseificação.

A unidade de purificação de gás é dividida em duas linhas: uma para purificação do ar utilizado na fluidização, e outra para purificação do gás de síntese produzido.

Após a gaseificação os materiais particulados são removidos do gás de síntese através do uso de ciclones e é resfriado através de trocadores de calor. O calor gerado é então utilizado para a produção de energia, através da passagem por uma turbina a gás. Tanto o calor gerado, quanto a energia elétrica são utilizados para o abastecimento do distrito onde a planta está instalada.

O gás após ser resfriado passa por filtros, que são responsáveis por retirar cerca de 30% do alcatrão, e o restante é retirado na lavagem em *scrubber* a óleo. O agente de lavagem é reciclado para a zona de combustão do gaseificador. O gás de síntese passa por coluna de um catalisador HDS, que converte compostos sulfurados a H₂S, o gás é

então passado em uma coluna de ZnO, que retira o H₂S e o HCl por meio de blindagem química.

A unidade de síntese conta com um reator de lama borbulhante (SBCR) com catalisador comercial de Fischer-Tropsch. Assim como os outros processos os produtos gerados são hidrocarbonetos parafínicos de cadeias longas. As partículas de catalisador são retiradas do produto por decantação e retornam ao reator. O gás residual é resfriado a temperatura de 15°C por meio de condensação das parafinas de cadeias curtas. E é em seguida queimado e usado em turbinas a gás para a geração de energia elétrica.

O *upgrading* é realizado em refinaria comercial.

IV.5 Análises tecnológica

Em um recente trabalho de monitoramento das tecnologias BTL disponíveis no mundo, conduzido com nome de Renew (2008) foram realizadas análises comparativas entre as diversas linhas de pesquisa disponíveis.

A primeira constatação deste trabalho foi que as principais diferenças entre os projetos BTL, em relação aos projetos convencionais de aplicação de síntese Fischer-Tropsch, CTL e GTL, são a razão do gás de síntese, o menor poder calorífico, maior umidade da biomassa, e processos de purificação específicos (variam de acordo com o projeto). A Tabela IV-1 resume as principais semelhanças e diferenças entre os projetos BTL em relação aos processos CTL e XTL.

Tabela IV-1 Semelhanças e Diferenças entre a tecnologia BTL e as tecnologias GTL/CTL (vermelho=diferenças, verde=semelhanças)

| | GTL | CTL | BTL |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Matéria-prima | Gás Natural | Carvão | Biomassa |
| Composição de CHO na matéria-prima | CH₄ ---H/C =4 | CH_{0,600,1}---H/C=0,6 | CH_{1,600,7}---H/C=1,6 |
| Armazenagem de matéria-prima bruta/ Poder Calorífico | Centralizada/ 37 MJ/kg | Centralizada/ 33 MJ/kg | Descentralizada/ 18 MJ/kg |
| Teor de água | Baixa | Baixa | alta |
| Esforços para pré-tratamento/ moagem em mm's | Baixa | alta/ viável | alta/ P&D |
| pressão | alta e constante | restrita pela matéria- | restrita pela matéria- |

| | GTL | CTL | BTL |
|--------------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|
| | | prima | prima |
| Esforços para purificação do gás | baixa | Alta | Alta |
| remoção de CO2 do gás bruto | não necessário | Rectisol | especifico por projeto |
| Esforços para condicionamento do gás | baixo | Alto | Alto |
| Síntese/ upgrading de produto | tecnologia comercial | tecnologia comercial | tecnologia commercial |
| importancia do reuso de água | dependente da síntese-FT | Alto | Alto |

Fonte: Renew, 2008

A fim de analisar as tecnologias entre as diferentes linhas de pesquisa apresentadas, foi elaborada a Tabela IV-2 afim de se resumir as particularidades de cada um destes processos.

Tabela IV-2 Principais diferenças técnicas dos processos estudados

| Projeto | cEF-D | dEF-D | CFB-D | ICFB-D |
|---|-------------------------------|-----------|-----------------------------|---------------------|
| Escala | Média | Grande | Média | Pequena/ (Média) |
| Produto Final | Diesel-FT | | Produtos brutos-FT | |
| Gaseificação | Leito Arrastado | | Leito fluidizado Circulante | |
| pré-tratamento térmico | Carbonização | Pirólise | - | |
| Purificação/ Condicionamento de gás | Absorção física Convencional: | | Tecnologia Exclusiva | |
| | Selexol | Rectisol | | |
| Integração Industrial | Auto-suficiente | Refinaria | Refinaria | Refinaria e Calor |

Fonte: Renew, 2008

Os principais parâmetros analisados no estudo da Renew, foram a eficiência geral do processo, e o status de maturidade do mesmo.

O processo que apresenta maior eficiência é o cEF-D da Choren, chegando a níveis de acima de 50% de geração de diesel, causada principalmente pela alta eficiência do gaseificador Carbo-V®. O Estudo, porém aponta que o projeto ICFB-D, é o que tem maior eficiência global na geração de energia, cerca de 80% porém destes apenas 20% são provenientes da produção de diesel (o menor índice entre os quatro

processos analisados), isto porque a geração integrada de diesel, calor e energia elétrica diminuem ao máximo a perda de energia, e aumentando assim a eficiência global do processo. A eficiência dos outros dois processos para a produção de diesel é de cerca de 35%.

Quanto à maturidade do processo diversos fatores foram utilizados para determinar o nível de maturidade das tecnologias, o resultado foi que apesar de que nenhuma delas possa ser considerada madura, o processo do cEF-D é o que está mais avançado. Os parâmetros considerados foram dados disponíveis de: operação, contatos com fornecedores, estudos de HSE (como Hazop e Hazid), plantas de engenharia e de processo, dados de balanço de massa. Além disso, o número de etapas necessárias para implementação de planta de escala comercial também foi considerado. A Tabela IV-3 mostra os resultados desta coleta de informações, pode-se observar que a diferença entre a maturidade da planta da Choren é gritante isso porque por possuir duas plantas já em operação todos os parâmetros observados na avaliação já se encontram disponíveis.

Tabela IV-3 Análise do grau de maturidade dos processos de obtenção de diesel

| Projeto | cEF-D | ICFB-D ta | dEF-D | CFB-D | ICFB-D C2 |
|-------------------------------------|--|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| Etapas para Scale up | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Balanço de massa | α : existente β : em progresso | - | - | - | - |
| Fornecedor de catalisador contatado | 1 | -1 | - | - | 1 |
| CaPEX/OPEX | disponível | Disponível | - | - | - |
| Plantas | disponível | - | - | - | - |
| Planta hidráulica | α : existente β : em progresso | - | - | - | - |
| Estudos HSE | α : existente β : em progresso | parcialmente disponível | - | - | - |
| Qualidade da modelagem | dados Experimentais + balanços de massa | dados Experimentais + balanços de massa | balanços de massa | balanços de massa | balanços de massa |

Fonte: Renew, 2008

Ainda são necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento nas diversas etapas do processo BTL. Estima-se que a produção de diesel BTL em grande escala deve acontecer por volta de 2012. A Tabela IV-4 mostra o cronograma estratégico de implementação da tecnologia BTL da idéia inicial a produção de diesel em escala comercial.

Tabela IV-4 Cronograma de implementação da energia BTL

Estágios gerais para o desenvolvimento de bioenergia

| | Primeira Evidência | Prova de Princípios | Desenvolvimento da Unidade de Operação | Integração e Demonstração | Comercialização |
|--------------------------------------|---|---|---|---|--|
| Desenvolvimento da Tecnologia | <ul style="list-style-type: none"> • Primeiros projetos • Dados isolados • Primeiros esboços | <ul style="list-style-type: none"> • Experimentos em escala de bancada • desenvolvimento de princípios básicos • Identificação de incertezas | <ul style="list-style-type: none"> • Entendimento das incertezas e limitações a nível de operação e respectivas soluções • Testes em escala piloto • Fomecedores para componentes chaves | <ul style="list-style-type: none"> • Demonstração e processo integrado • produção para teste de mercado | <ul style="list-style-type: none"> • Planta comercial construída e em funcionamento • Opções para posterior identificação de redução de custos |
| Tempo até a comercialização | | | | 8-15 anos | |
| | | | | 5-10 anos | |
| | | | | 3-8 anos | |
| | | | | 1-4 anos | |
| Linha do tempo do Projeto | | | | | 0-2 anos |
| UET | | | 2004/5 planta-α | 2007/8 8-plant, 43 MW | 2011/2012 |
| FZK | 2001 | 2003 Prolise, GSP | 2008 Bioliq-Firolise Piloto | 2011 Bioliq-BTL Piloto | |
| TUV | | 2005-7 Lama-FT | | 2009/2010 Bio-FIT, demo | 2010/2012 Bio-FIT, 60 MW |
| CUTEC | | 2006-7 | 2009, ABSART | 2010, MW Posterior Síntese de combustível | |

Fonte: Renew, 2008

IV.6 Conclusão

Com base nos dados disponíveis, percebe-se claramente que a linha de pesquisa mais avançada para a produção de diesel em escala comercial é o projeto cEF-D da Choren.

Por já possuir duas plantas em operação, ter a maior eficiência na produção de diesel e dados como balanços de massa, e fluxogramas de processos, este processo foi escolhido para ser utilizado como base neste estudo.

Capítulo V. Metodologia dos cálculos de custos para análise econômica

Este capítulo tem como objeto expor o método e considerações utilizadas para realização dos cálculos dos valores de investimento total e custos de produção de uma planta de BTL localizada no Brasil. Para isso foi considerado o projeto desenvolvido pela Choren cEF-D, por ser o que tem a maior maturidade, e consequentemente apresentar uma maior qualidade de dados disponíveis.

V.1 Princípios básicos.

Alguns princípios básicos de economia serão necessários para a realização desta análise econômica. O primeiro deles é o de economia de escala, que consiste no fato que a relação entre o aumento da escala de uma determinada planta e o aumento do seu custo não sofre uma relação linear, conforme a equação V.1 de Hamelinck et al. 2003 e. O fator de escala (R) tem como objetivo então corrigir esta relação. Em plantas químicas é adotado usualmente um valor entre 0,6 – 0,8. Esta relação será utilizada para análise da influência da capacidade instalada sobre os custos de investimento e produção.

$$\frac{Custo_b}{Custo_a} = \left(\frac{Tamanho_b}{Tamanho_a} \right)^R \quad (V.1)$$

Os fatores de escala são determinados através da experiência e de dados da literatura. Para este estudo os dados de custo de equipamentos bem como fatores de escala foram retirados dos artigos que se tornaram referência para plantas BTL, sendo eles Hamelinck et al. (2003), Tjimensen et al. (2002) e Knoeff et al (2005). Recentemente estes dados foram compilados no Relatório Final da Renew (2008).

V.2 Investimento Total

Uma forma de se determinar o investimento total é através da determinação dos investimentos fixos e variáveis. Entre os custos de investimento fixo estão o ISBL ¹ e o

¹ ISBL: custo instalado dos equipamentos diretamente envolvidos na produção (Inside Battery Limits)

OSBL². O investimento total de uma planta de 500 MW pode ser calculado como na Tabela V-1 .

Tabela V-1 Calculo do Investimento total

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| ISBL | I_1 |
| OSBL | $I_2 = 0,23 I_1$ |
| Total de Custos Fixos | $I_1 + I_2$ |
| Custo com Engenharia | $I_3 = 0,10 (I_1 + I_2)$ |
| Custos com construção | $I_4 = 0,10 (I_1 + I_2)$ |
| Custo de Partida | $I_5 = 0,5 (I_1 + I_2)$ |
| Investimento Total | $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5$ |

Fonte: Adaptado de Chavel et al. (1989). e Hamelinck et al. (2003)

O custo referente ao ISBL é calculado somando-se os custos dos principais equipamentos da instalação (obtidos através da literatura). Nem sempre é possível encontrar equipamentos com a mesma capacidade que a desejada. Para as correções necessárias foram utilizados fatores de escala encontrados na literatura.

Assim resolvendo-se os fatores do investimento total temos que este é igual a $1,54 * ISBL$.

Tabela V-2 Dados para o cálculo do fator de implementação

| ISBL (I1) | ISBL |
|---------------------------|-----------------|
| OSBL (I2) | |
| Instrumentação e Controle | 2,50% |
| Alvenaria | 1,40% |
| Conexões elétricas | 2,10% |
| Preparação do terreno | 0,50% |
| Construção civil | 9,20% |
| Eletrônicos | 3,50% |
| Instalações hidráulicas | 4,00% |
| OSBL (I2) | $0,23 * (ISBL)$ |

² OSBL: Outside Battery Limits

| | |
|-------------------------------------|--|
| Investimentos Indiretos | |
| Custo de Engenharia (I3) | 10% de (I1 + I2) |
| Custo com tempo de construção (I4) | 10% de (I1 + I2) |
| Custos com a Partida da Planta (I5) | 5% de (I1 + I2) |
| Investimento Total | $ISBL+0,23ISBL+0,25(ISBL+0,23*ISBL)=1,54*ISBL$ |

Fonte: Adaptado do Relatório Final da Renew (2008) com dados de Hamelinc et al. (2003)

Todos os fatores utilizados podem ser vistos nas tabelas do Anexo A.

V.3 *Custo de Produção*

O custo de produção de determinado produto, no caso deste estudo o biodiesel sintético, é composto por diversas parcelas. Uma forma utilizada é dividi-las em custos relacionados com insumos, custos relacionados com operação, outros custos (como administração, seguro e etc.) e custos relacionados ao capital. Além disso, pode-se descontar destes custos a renda gerada pela venda de alguns sub-produtos, como a nafta, o calor e energia elétrica. Neste estudo será considerada apenas a comercialização da nafta, sendo o calor e a energia elétrica gerados utilizados na própria planta.

V.3.1 Custo de Insumos

A fim de se melhor avaliar a influência da biomassa na composição do custo com insumos este foi dividido em custos relacionados ao consumo de biomassa, e custos relacionados a outros insumos.

Para o cálculo do custo de insumos utilizados para a conversão de 500 MW de biomassa em diesel, foram utilizados os balanços de materiais disponibilizados pela empresa Choren para elaboração da análise LCA (life cycle assessment)³ realizado pelo projeto Renew (2008), encomendado pela União Européia. Foram utilizados os balanços de consumo de insumos do processo operando tanto com biomassa herbácea quanto lenhosa.

³ Life Cycle Assessment, ou análise do ciclo de vida de um produto tem como objetivo determinar as emissões de gases que um determinado produto será responsável desde a produção dos seus insumos até sua disposição final.

Os preços dos insumos consumidos, com exclusão da biomassa, foram obtidos de diversas fonte e encontram-se resumidos na Tabela V-3.

Tabela V-3 Preço dos Insumos consumidos na conversão de biomassa

| Material | Custo | Fonte |
|--------------------------|-----------------------|-------------------|
| Gás Natural | 40 €/MWh | Renew, 2008 |
| NaOH | 155 €/t | [IEA, 2003] |
| Água de rejeito | 2,16 €/m ³ | [Detering, 2004] |
| Cinzas | 30 €/t | [Detering, 2004] |
| Cinzas retidas no filtro | 50 €/t | [Detering, 2004] |
| Lama | 60 €/t | [IE, 2006] |

Fonte: Própria

Para os cálculos dos custos com biomassa foram considerados o preço da biomassa, os custos com transporte, com armazenamento e manejo.

Para o cálculo do custo com transporte foi considerada a seguinte fórmula (Lopes da Silva et al., 2007):

$$CT = \frac{Pf}{Cap} * 2D$$

Onde: CT é o custo de transporte, Pf é o fator indicativo do preço médio do frete no mercado por km (US\$/km), Cap é a capacidade de carga em m³ e D é a distância em km, considerando viagem de ida e volta.

Segundo Lopes da Silva et al. (2007) o fator indicativo do preço médio por km é de US\$1,5/km.

Foi considerado ainda o uso de caminhões com capacidade de transporte de 55 m³ de biomassa, que é a capacidade média de um caminhão.

Para os cálculos de custos com armazenamento e manejo (carregamento e descarregamento dos caminhões) foi considerado 0,073 €/ m³ para o manejo e 5,3 €/ m³/por ano para o armazenamento (Boerrigter, 2006). Foi considerado o armazenamento durante um ano de quantidade suficiente para alimentar a fábrica durante uma semana.

V.3.2 Custo de Operação e outros custos

Para o cálculo dos custos de operação e outros custos fixos, como seguro, administração e etc. foram utilizados os parâmetros sugeridos em Boerrinter (2006), Hamelinck (2004) e Detering (2004), os quais se encontram na Tabela V-4.

Tabela V-4 Parâmetros considerados para cálculo de custos com operação e outros custos

| Custos com operação | Condição |
|--|------------------------------------|
| Custo com pessoal | 0,5% p.a (do investimento total) |
| Custos com serviços e Operação | 3% p.a (do investimento total) |
| Outros custos | Condição |
| Seguro | 1% p.a (do investimento total) |
| Administração | 0,5% p.a (do investimento total) |
| Outros custos (impostos, contingências e etc.) | 1,75% p.a (do investimento total)) |

Fonte: Própria.

V.3.3 Custos relacionados ao capital

Para o cálculo deste custo foram considerados somente os custos decorrentes da depreciação linear dos equipamentos, com taxa de 10% do ISBL ao ano.

V.3.4 Custo recuperados com a revenda de sub-produtos

Apesar de o balanço mássico do processo indicar que existe geração de energia e calor excedentes, os ganhos provenientes destas fontes não foram considerados para o cálculo de custo de produção. Assim o único sub-produto a ser comercializado seria a nafta, com preço de 801 US\$/t (Mainente, 2006).

Capítulo VI. Resultados do cálculo do Investimento Total e dos Custos de Produção

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados dos cálculos dos custos de Investimento e Produção. Foram considerados três cenários quanto à matéria-prima biomássica: 100% herbácea (Bagaço de cana), 100% lenhosa (Eucalipto) e uma com 50% herbácea+50%lenhosa.

Com base nas premissas definidas no capítulo anterior, foram realizados os cálculos de Investimento Total e custo de produção de biodiesel por rota BTL no Brasil, considerando o projeto Choren cEF-D.

VI.1 Considerações admitidas

A fim de se realizar os cálculos de investimento e custos de produção, diversas considerações foram feitas, estando estas na Tabela VI-1.

Tabela VI-1 Considerações utilizadas no estudo

| Considerações | Valor | Unidade | Observações | Fonte |
|-----------------------------|---------|---------|--|------------------------------|
| Cotação do dólar | 1,7 | R\$ | | |
| Cotação do Euro | 2,4 | R\$ | | |
| Número de horas em operação | 8000 | H | Considerando-se funcionamento sem interrupção por um ano, apenas com paradas para manutenção | Hamelinck, 2004 |
| Produção de diesel por ano | 5616000 | GJ/a | Considerando Capacidade da planta de 500MW de biomassa | |
| Capacidade instalada | 500 | MW | | |
| Conversão do diesel | 39% | % | Processo da Choren | Choren, 2008 |
| Conversão do Nafta | 14% | % | Processo da Choren | Choren, 2008 |
| Preço do Nafta | 1021,7 | R\$/t | | Mainente, 2006 |
| Preço do eucalipto | 115 | R\$/t | Considerando-se produção de 50 m3 por hectare e densidade da madeira de 500 kg/m3 | Lopes da Silva, et al., 2007 |
| Preço bagaço de cana | 10 | R\$/t | Considerado de acordo com média histórica de preços | |

| Considerações | Valor | Unidade | Observações | Fonte |
|---|-------------|---------|--|-----------------------------|
| Densidade energética eucalipto | 19,42 | GJ/t | | Renew, 2008 |
| Densidade energética bagaço de cana | 18,1 | GJ/t | | Falabella, 2007 |
| Densidade energética nafta | 43,7 | GJ/t | | ANP, 2008 |
| Custo transporte matéria prima bagaço | 163,1532424 | R\$/t | | Lopes da Silva et al.,2007 |
| Custo transporte matéria prima eucalipto | 46,71403636 | R\$/t | | Lopes da Silva et al.,2007 |
| Perdas de biomassa | 1,03 | - | Considerando perda de 3% de biomassa durante o armazenamento | |
| Custo de armazenamento matéria prima bagaço | 88,85163453 | R\$/t | | Boerrenghier, 2006 |
| Custo de armazenamento matéria prima eucalipto | 25,44 | R\$/t | | Boerrenghier,2006 |
| Juros relativos a empréstimo do investimento ao ano | 10% | % | | Spitz/Landau, 1966 |
| Distância entre fornecedor de biomassa e planta BTL | 250 | km | | |
| Custo de transporte por km | R\$ 3,00 | R\$/km | | Lopes da Silva et al., 2007 |
| Poder calorífico do Diesel em GJ/l | 33,9984 | GJ/l | | ANP, 2008 |

Fonte: própria

VI.2 Resultados do Investimento Total e do Custo de Produção: Bagaço de cana-de-açúcar

O Investimento Total de uma planta BTL alimentada com bagaço considerando que este necessita do processo de pirólise como forma de pré-tratamento, está exposto na Tabela VI-2, considerando-se o fator de implementação de 1,54.

Tabela VI-2 Investimento Total utilizando bagaço de cana-de-açúcar

| | Milhões de R\$ |
|--------------------|----------------|
| ISBL | 903,88 |
| Investimento Total | 1.391,98 |

Fonte: Própria

O custo de produção foi calculado inicialmente considerando-se o preço do bagaço de cana igual a R\$10,00/t. O custo de produção encontrado foi de R\$ 56,322/GJ, ou R\$ 1,66/litro de diesel.

Tabela VI-3 Custo de produção de Diesel utilizando bagaço de cana-de-açúcar

| Custo de produção do diesel | R\$/GJ de diesel | % |
|---|------------------|-------------|
| Custo com consumo com biomassa | 25,53 | 45% |
| Custo com consumo de outras matérias-primas | 2,70 | 5% |
| Custo com produção | 12,52 | 22% |
| Outros custos | 8,06 | 14% |
| Depreciação | 16,09 | 29% |
| Revenda de Nafta | -8,57 | -15% |
| Custo Total de produção do diesel | 56,32 | 100% |

Fonte: Própria

VI.3 Resultados Investimento Total e do Custo de Produção: Eucalipto

O Investimento Total de uma planta BTL alimentada com eucalipto considerando que este necessita do processo de corte da madeira como forma de pré-tratamento, está exposto na Tabela VI-4, considerando-se o fator de implementação de 1,54.

Tabela VI-4 Investimento Total utilizando eucalipto

| | Milhões de R\$ |
|--------------------|----------------|
| ISBL | 874,29 |
| Investimento Total | 1.346,40 |

Fonte: Própria

O custo de produção foi calculado considerando-se o preço do eucalipto igual a R\$115,00/t. O custo de produção encontrado foi de R\$ 50,28/GJ, ou de R\$ 1,48/litro de diesel.

Tabela VI-5 Custo de produção de Diesel utilizando eucalipto

| Custo de produção do diesel | R\$/GJ de diesel | % |
|---|------------------|-------------|
| Custo com consumo com biomassa | 22,06 | 44% |
| Custo com consumo de outras matérias-primas | 1,32 | 3% |
| Custo com produção | 12,11 | 24% |
| Custo referente a outros custos | 7,79 | 15% |
| Depreciação | 15,57 | 31% |
| Custo referente a revenda de Nafta | -8,57 | -17% |
| Custo Total de produção do diesel | 50,28 | 100% |

Fonte: Própria

VI.4 Resultados do Investimento Total e de Produção: 50%Eucalipto+50%Bagaço de cana

O Investimento Total de uma planta BTL alimentada com bagaço e eucalipto considerando que este necessita do processo de corte da madeira do eucalipto e pirólise do bagaço como formas de pré-tratamento, está exposto na Tabela VII-1, considerando-se o fator de implementação de 1,54.

Tabela VI-6 Investimento Total para planta utilizado 50% de bagaço de cana + 50% de eucalipto

| | Milhões de R\$ |
|--------------------|----------------|
| ISBL | 937,36 |
| Investimento Total | 1.443,53 |

Fonte: Própria

O custo de produção foi calculado inicialmente considerando-se o preço do bagaço de cana igual a R\$10,00/t e o do eucalipto igual a R\$ 115,00/t. O custo de produção encontrado foi de R\$ 62,17/GJ, ou de R\$ 1,83/litro de diesel.

Tabela VI-7 Custo de produção de Diesel para planta utilizado 50% de bagaço de cana + 50% de eucalipto

| Custo de produção do diesel | R\$/GJ de diesel | % |
|---|------------------|-------------|
| Custo com consumo com biomassa | 30,71 | 49% |
| Custo com consumo de outras matérias-primas | 2,01 | 3% |
| Custo com produção | 12,98 | 21% |
| Custo referente a outros custos | 8,35 | 13% |
| Depreciação | 16,69 | 27% |
| Custo referente a revenda de Nafta | -8,57 | -14% |
| Custo Total de produção do diesel | 62,17 | 100% |

Fonte: Própria

VI.5 Conclusão

Analisando-se os resultados obtidos e comparados com os dados obtidos no relatório da Renew (2008), verifica-se que o custo de produção é elevado se comparado ao preço do diesel nas bombas (R\$ 2,10/litro).

O maior contribuinte no custo de produção é a biomassa, que necessita além do custo com sua aquisição tem o custo com o transporte, armazenamento e manejo da mesma.

Apesar do custo com biomassa ser alto no Brasil levando a um alto custo de produção de diesel, quando comparamos com os dados obtidos pelo relatório da Renew (2008), mostrado na Tabela VI-8 e na Tabela VI-9, verificamos que o preço da biomassa é ainda maior e tem maior peso no custo total de produção. Os dados coletados nas tabelas foram para o mesmo processo considerado no estudo, o cEF-D, com os dados de custo de matéria-prima considerados para a região que gera os menores custo dentro da união européia, o Leste Europeu.

Percebe-se que o custo de produção no Brasil é menor que no resto do mundo. Pode-se perceber que a principal diferença está nos custos associados à matéria-prima, que é bem menor no Brasil. Isso pode ser explicado pelas condições de clima e dos solos encontrados no Brasil, que favorecem a agricultura.

Pode se perceber que a contribuição do custo com a biomassa é muito mais importante na contribuição do custo total na União Européia que no Brasil.

Tabela VI-8 Comparação entre os custos de produção de diesel utilizando matéria-prima lenhosa no Brasil e na União Européia

| Custo de produção do diesel | Custo de Produção de diesel no Brasil | | Custo de Produção de diesel na União Européia | |
|--|---------------------------------------|-------------|---|-------------|
| | R\$/GJ de diesel | % | R\$/GJ de diesel | % |
| Custo com consumo com biomassa | 22,06 | 44% | 52,80 | 66% |
| Custo com consumo de outras matérias-primas | 1,32 | 3% | 2,40 | 3% |
| Custo com produção + outros custos | 19,90 | 39% | 12,03 | 15% |
| Depreciação | 15,57 | 31% | 19,23 | 24% |
| Custo referente a revenda de Nafta | -8,57 | -17% | -6,29 | 8% |
| Custo Total de produção do diesel | 50,28 | 100% | 80,17 | 100% |

Fonte: Adaptado de Renew, 2008

Tabela VI-9 Comparação entre os custos de produção de diesel utilizando matéria-prima herbácea no Brasil e na União Européia

| Custo de produção do diesel | Custo de Produção de diesel no Brasil | | Custo de Produção de diesel na União Européia | |
|--|---------------------------------------|-------------|---|-------------|
| | R\$/GJ de diesel | % | R\$/GJ de diesel | % |
| Custo com consumo com biomassa | 25,53 | 45% | 29,73 | 52,3% |
| Custo com consumo de outras matérias-primas | 2,70 | 5% | 2,40 | 4,2% |
| Custo com produção + outros custos | 20,58 | 36% | 12,03 | 21,2% |
| Depreciação | 16,09 | 29% | 19,23 | 33,8% |
| Custo referente a revenda de Nafta | -8,57 | -15% | -6,57 | -11,6% |
| Custo Total de produção do diesel | 56,32 | 100% | 56,82 | 100% |

Fonte: Adaptado de Renew, 2008

Além do menor custo frente ao biodiesel sintético produzido na Europa, o biodiesel sintético produzido no Brasil tem custo de produção inferior ao biodiesel produzido pela transesterificação de lipídeos, técnica que já vem sendo desenvolvida há alguns anos. A Tabela VI-10 mostra que o custo de produção do biodiesel sintético é na maior parte das vezes menor que do biodiesel tradicional.

Tabela VI-10 Custo de produção de biodiesel pela reação de transesterificação

| Matéria-prima biomássica | R\$/l |
|-----------------------------|-----------|
| Óleo de soja | 2,59-2,42 |
| Óleo de pinhão manso | 1,21 |
| Óleo de dendê | 2,62 |
| Óleo de girassol | 2,33 |
| Óleo de mamona | 5,70 |

Fonte: Valor Econômico (2007)

Comparando-se os custos de produção com dos três cenários analisados, alimentação com bagaço, com eucalipto e com 50%de bagaço + 50% de eucalipto, verificamos que o maior custo de produção é obtido para a planta que utiliza tanto matéria-prima herbácea, quanto lenhosa, isso porque há a necessidade de se ter tanto equipamentos de pirólise rápida como de corte de eucalipto, aumentando assim o Investimento total e por conseqüência os custos que são estimados a partir dele, como o de operação e outros custos.

O custo mais baixo foi obtido para a planta com matéria-prima lenhosa, isto porque o custo de transporte da matéria-prima lenhosa é bastante inferior ao da matéria-

prima herbácea (Anexo B). Isso se deve ao fato da menor densidade do bagaço de cana em relação ao eucalipto.

Porém como o preço do bagaço de cana é bastante volátil, e a grande quantidade de usinas produtoras de bagaço estarem bastante distribuídas pelo estado de São Paulo, levando a crer que uma distância de 250 km de distância entre as fontes produtoras de bagaço e a planta estar super estimada. Por isso serão realizadas algumas análises de sensibilidade em relação a estes fatores no próximo capítulo.

Capítulo VII. Análise de sensibilidade do Investimento Total e do Custo de Produção: Bagaço de cana-de-açúcar

VII.1 Introdução

A análise de sensibilidade tem como objetivo determinar a importância da variação de determinada variável no custo total de produção. Para isso escolhe-se a variável de teste e aumenta e diminui o seu valor de forma sistemática, mantendo todas as outras variáveis constantes, e verifica-se a influência que esta tem no custo final. (Brito, 2003)

VII.2 Análises de sensibilidade

Neste capítulo, deseja-se analisar a influência dos custos com biomassa e da capacidade instalada no custo total de produção, o processo escolhido foi o do bagaço cana-de-açúcar, por ser o insumo que apresenta maior volatilidade a respeito do custo da biomassa. Além do que por apresentar a destinação final de um produto que pode ser considerado um resíduo há um ganho ambiental com a sua implementação.

Os resultados deste processo foram apresentados no capítulo anterior e podem ser resumidos na Tabela VII-1 e na Figura VII-1.

Tabela VII-1 Investimento Total e Custo de Produção

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Investimento Total | MR\$1.391,98 |
| Custo de Produção | R\$56,32/GJ de diesel |
| | R\$1,66/litro de diesel |

Fonte: Própria

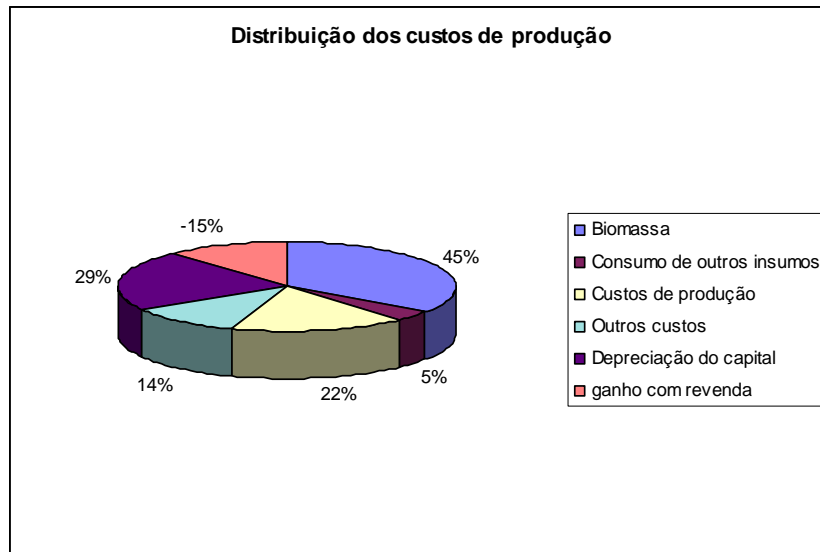


Figura VII-1 Distribuição dos custos de produção

Fonte: Própria

Pode-se notar pela Figura VII-1 que o maior componente no custo total de produção do diesel é a matéria-prima, o preço deste insumo é bastante volátil foi realizado uma análise de sensibilidade do preço do bagaço, foram considerados R\$ 5,00/t, R\$ 15,00/t , R\$ 20,00/t e R\$ 25,00 por tonelada, os custos em R\$/litro de diesel foram: R\$1,64/l , R\$1,68/l, R\$1,70/l, R\$1,72/l . Os resultados em R\$/GJ de diesel, encontram-se na Tabela VII-2.

Tabela VII-2 Análise de sensibilidade quanto ao preço do bagaço

| Preço da Biomassa R\$/t | Custo total de Produção em R\$/GJ de diesel | $\Delta\%$ em relação ao custo de produção com matéria-prima custando R\$ 10,00/t |
|-------------------------|---|---|
| 5,00 | 55,59 | -1,3 |
| 15,00 | 57,05 | 1,3 |
| 20,00 | 57,78 | 2,6 |
| 25,00 | 58,51 | 3,9 |

Fonte:Própria

Verifica-se que o custo de produção final do diesel, não é muito afetado por variações no preço da biomassa.

Uma análise da influência da distância entre a fonte geradora de biomassa e a planta BTL também foi realizada, além da análise considerando-se uma distância de 250 km, foram feitas também análises para 200, 150, 100 e 50 km, com custos de produção

em R\$/litro de R\$1,52/l, R\$1,38/l, R\$1,24/l, R\$1,10/l. Os resultados em R\$/GJ de diesel, encontram-se na Tabela VII-3.

Tabela VII-3 Análise de sensibilidade quanto a distância da fonte fornecedora de biomassa

| Distância em km | Custo total de Produção em R\$/GJ de diesel | $\Delta\%$ em relação ao custo de produção com matéria-prima custando R\$ 10,00/t |
|-----------------|---|---|
| 200 | 51,60 | -8,4 |
| 150 | 46,87 | -16,8 |
| 100 | 42,15 | -25,2 |
| 50 | 37,42 | -33,6 |

Fonte: Própria

Esta análise revela a principal fragilidade em se utilizar biomassa para a produção de energia, o seu custo com transporte. Isso se deve ao fato da baixa densidade energética da mesma, fazendo com que grandes volumes de biomassa sejam necessários para a geração de energia. Esta análise revela a importância de se manter a planta de geração de biodiesel sintético próximo aos fornecedores de matéria-prima, corroborando para a premissa de instalação da planta no Estado de São Paulo.

Foi realizada então uma análise da influência da capacidade da planta, e o custo de produção da planta. Para isso utilizou-se o fator de escala de 0.7, para o cálculo do novo Investimento Total, tendo como resultado a Tabela VII-4.

Tabela VII-4 Sensibilidade quanto a capacidade instalada

| Capacidade em MW de biomassa | investimento em R\$/GJ | Custo de produção em R\$/GJ de diesel | Custo de produção em R\$/litro de diesel |
|------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--|
| 50 | 6976,44 | 203,43 | 5,98 |
| 100 | 4294,50 | 132,78 | 3,91 |
| 200 | 2643,58 | 89,29 | 2,63 |
| 250 | 2261,28 | 79,22 | 2,33 |
| 500 | 1391,98 | 56,32 | 1,66 |
| 1000 | 856,87 | 42,23 | 1,24 |
| 2000 | 527,46 | 33,55 | 0,99 |

Fonte: Própria

Como de esperado um aumento na capacidade leva a grande ganhos no que diz respeito aos custos de investimento e de produção, porém estes resultados devem ser analisados, com cuidado, já que um aumento de escala envolveria uma necessidade maior de biomassa disponível, o que é bastante delicado. Por exemplo, uma planta com

capacidade de 1000MW, necessitaria de cerca de 1,5 milhões de toneladas de biomassa por ano.

VII.3 Conclusão

A análise de sensibilidade confirmou a suspeita quanto à influência do custo da matéria-prima no custo total de produção. Apesar do preço de aquisição da mesma não influenciar significativamente no custo total de produção como imaginado, a distância entre o fornecedor e a planta BTL, mostrou que influencia significativamente no custo total, Figura VII-2 . Isso é especialmente verdade para o bagaço de cana e outras biomassas de baixa densidade, pois é necessário que se transporte grandes volumes de matéria-prima para se ter energia suficiente para alimentar a planta.

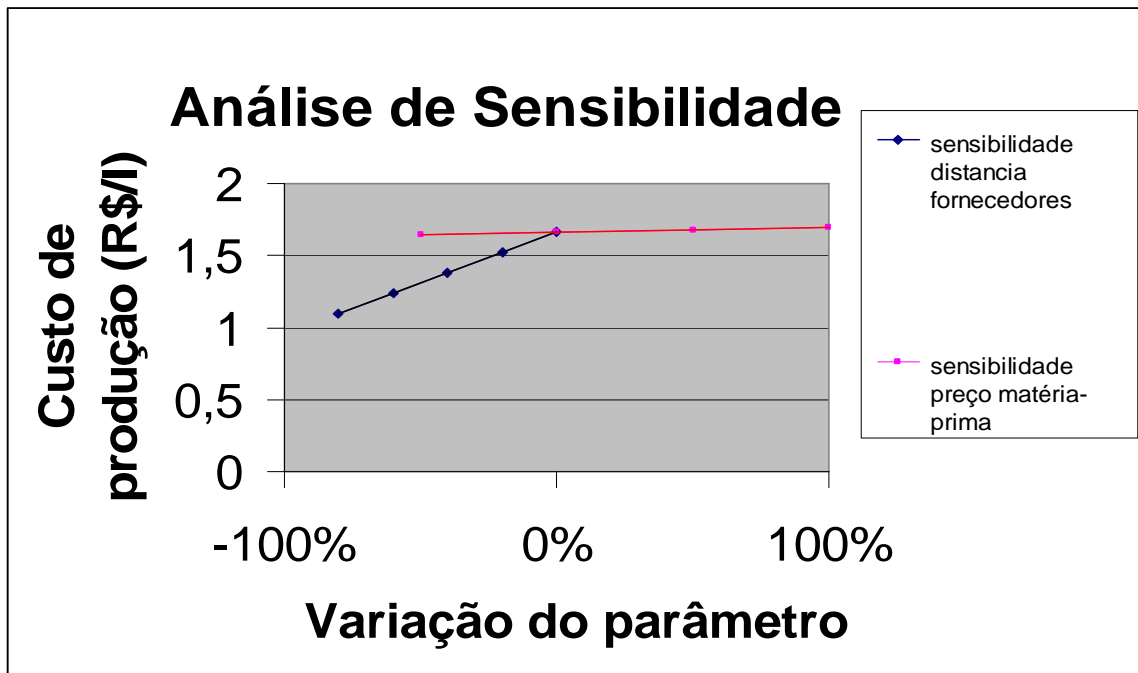


Figura VII-2 Análise de sensibilidade

Fonte: Própria

Percebe-se então a importância da localização da planta BTL. É então recomendado estudos minuciosos para determinação da localização ótima da planta.

Uma alternativa para se diminuir estes custo seria utilizar o conceito de pirólise descentralizada, assim com o aumento da densidade do produto a ser transportado seu custo diminuiria.

Capítulo VIII. Considerações Finais

Apesar das vantagens do diesel gerado pelo processo BTL, diminuição das emissões, utilização de fontes renováveis, a diminuição da dependência do petróleo e etc. O custo de produção do chamado biodiesel sintético é alto.

Através das análises realizadas percebe-se que o custo de produção do diesel pela tecnologia BTL, quando comparados com o diesel convencional comercializado atualmente é alto. Apesar do diesel convencional custar R\$ 2,10/litro, neste preço já estão incluídos impostos, margem de lucro do distribuidor, da revenda e da produção. (Anp, 2008).

Espera-se que com o avanço da tecnologia, e com os ganhos na eficiência oriundos da experiência, este custo diminua. Outra forma de se tornar o biodiesel sintético uma alternativa real é a diminuição dos impostos no diesel produzido por esta rota.

Pode-se também usar a mesma estratégia que vem sendo utilizada para a inserção do biodiesel proveniente da transesterificação de lipídeos, a criação de metas de mistura do biodiesel ao diesel convencional. O ganho com tal estratégia não seria somente ambiental, já que apesar de pequena haveria uma diminuição da emissão de CO₂, mas também na qualidade do diesel. Como discutido no Capítulo 3 o biodiesel sintético apresenta maior qualidade que o convencional, além de ser livre de enxofre.

O fato de representar quase 50% do custo de produção do diesel, os custos relacionadas à biomassa merecem maior atenção na hora de se implementar uma planta BTL. Assim, apesar de diversas fontes de biomassa poderem ser consideradas para o processo, existe a necessidade de se analisar os custos envolvidos em sua aquisição e transporte. Matérias-primas com menor densidade tendem a gerar diesel com maior custo de produção.

Isto porque por não possuir um sistema ferroviário eficiente, há a necessidade de se fazer o transporte por rodovias, um forma cara de transporte já que a capacidade de transporte é reduzida. Necessitando-se de diversas viagens. A implementação de um sistema ferroviário eficiente poderia levar a uma redução nos custos de produção do diesel.

Com isso a premissa simplista de se considerar que a planta está localizada a 250 km da fonte de matéria-prima faz com que os custos associados ao transporte sejam altos. Mostrando assim a decisão crucial que a localização da planta significa neste processo.

Outra forma de se diminuir os custos com produção é através da implementação de plantas descentralizadas de pirólise nas unidades produtoras de biomassa.

Apesar de o custo de produção de biodiesel pelo processo BTL, ser menor no Brasil que nos países da União Européia, deve-se ainda analisar que o Brasil já é abastecido por outros combustíveis líquidos de fonte renovável, como o etanol e o biodiesel. O biodiesel produzido pela transesterificação de lipídeos é atualmente produzido no Brasil com custos superiores ao esperado para o biodiesel sintético, conforme discutido no capítulo 6. Além disso, sua qualidade é superior ao do biodiesel produzido por transesterificação, e com as propostas sugeridas neste estudo, existe a possibilidade real de queda nos custos de produção, confirmando assim seu potencial de implementação no Brasil.

O projeto desenvolvido possui algumas limitações:

- Dados do balanço de massa utilizados, por terem sido utilizados dados obtidos pelo estudo LCA que não foram elaborados para este fim. Dados mais precisos são protegidos por serem considerados segredos industriais.
- Não consideração de um custo diferenciado de equipamentos no Brasil em relação ao seu custo na Europa, devido à necessidade de se importar alguns dos equipamentos seu custo pode ser superior ao considerado neste estudo.
- A localização da planta ter sido feita de forma simplista, não tendo sido realizado um estudo mais aprofundado quanto a isso.

Este trabalho pode ser utilizado como base para o desenvolvimento de mais estudos sobre esta tecnologia, entre eles:

- Estudo quanto à localização ideal da planta BTL
- Investigação de outras matérias-primas como insumo para a gaseificação
- Melhorias na logística e transporte das matérias-primas.

Capítulo IX. Referencias

1. Abengoa SA, AB Volvo, AGA Gas AB, Haldor Topsøe A/S, LRF LantbrukarnasRilksförbund, OKQ8, Preem Petroleum AB, Sydkaft AB, TPS Termiska Processer AB, Växjö Energi AB, “*The Bio-DME Project Phase I*”, Relatório para a Administração Nacional da Suécia – 2002
2. ABRAC online, Dados disponíveis em: <www.abrac.com.br>. Acessado em: 04 de agosto de 2008.
3. ANP, Agencia Nacional de Petróleo , Dados disponíveis em: <www.anp.gov.br>. Acessado em: 06 de setembro de 2008
4. Aracruz Celulose, Dados disponíveis em: <www.aracruz.com.br>. Acessado em 06 de setembro de 2008
5. Banco de Dados de biomassa no brasil , Dados disponíveis em : <infoener.iee.usp.br/cenbio/texto/biomassa.htm>. Acessado em: 24 de agosto de 2008
6. Batista, F. Excesso de bagaço nesta safra causa mais despesas ao usineiro, 2007. Gazeta Mercantil . Disponível em :<<http://clipping.planejamento.gov.br/Noticias.asp?NOTCod=387431>>. Acessado em: 14 de agosto de 2008.
7. Boerrigte,H Economy of biomass-to-liquid (BTL) plants: Na engineering assessment, ECN Biomass,Coal and Environmental research, 2006
8. Bracelpa, Relatório Estatístico 2007/2008, Disponível em: <www.bracelpa.org.br>. Acessado em: 29 de agosto de 2008
9. Brito, P. , Análise e viabilidade de Projetos de investimento, Editora Atlas S:A, 2003
10. BPI, Preço do petróleo: onde irá parar? Diário Economico edição de 26/05/2006 disponível em: <<http://diarioeconomico.com/edicion/diarioeconomico/analise/pt/desarrollo/1127631.html>>. Acessado em: 27 de agosto de 2008
11. Cenbio, Centro Nacional de referencia em Biomassa, Estado da Arte da Gaseificação, 2002 Disponível em: <www.cenbio.org.br>. Acessado em: 01 de setembro de 2008
12. Choren, Dados disponíveis em: <www.choren.com>. Acessado em: 03 de setembro de 2008
13. Christou M., (Centre for Renewable Energy Sources – CRES), “Bioenergy chains fromperennial crops in Europe”, EU-China workshop on liquid biofuels, 2004
14. Detering, M. et al., Vergleichende ökonomische Bewertung der Biomassevergasung zur Strom- und Wärmebereitstellung, Arbeitsbericht der Projektgemeinschaft Biomassevergasung, Leipzig, 2004
15. EPE, empresa de pesquisa energética, Balanço Energético Nacional 2008, Disponível

em: < ben.epe.gov.br/> acessado em: 06 de setembro de 2008

16. Falabella Souza-Aguiar, E., Sousa, S.S.A.,Oliveira,F.B,BTL: a solution to increase energy efficiency in the Brazilian alcohol business, 2007
17. Gómez, E.O, A Tecnologia de Pirólise no Contexto da Produção Moderna de Biocombustíveis: Uma Visão Perspectiva. Ambiente Brasil. Disponível em: <www.ambientebrasil.com.br 2008>. Acessado em: 05 de setembro de 2008
18. Hamelinck, C.N.,Faiij,A.P.C, Uil,H.Boerrigter,H.,Production of FT transportation fuels from biomass;technical options, process analysis and optimisation,and development potential, 2003 Disponível em: <www.elsevier.com/locate/energy>. Acessado em: 03 de fevereiro de 2008
19. International Energy Agency (IEA), “Sustainable Production of Woody Biomass for Energy” – A Position Paper Prepared by IEA Bioenergy, 2002
20. Kavalov, B., Peteves, S.D. , Status and perspectives of biomass-to-liquid fuels in european union, Holanda, 2005
21. Knoef, H.A.M. et al., Handbook biomass gasification, BTG biomass technology group BV, 2005,ISBN: 90-810068-1-9
22. Lamam, Laboratório de Microbiologia Agrícola e nuclear, UFSCar, notas de aula, CAULE,2008, disponível em: <http://www.cca.ufscar.br/lamam/disciplinas_arquivos/CAULE.ppt#256,1,CAULE>. Acessado em 05 de agosto de 2008
23. Lopes da Silva,M.; Oliveira,R. J. O.;Valverde, S.R.;Machado,C.C.;Pires, V.A.V.,Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos, Rev. Árvore vol.31 no.6 Viçosa Nov./Dec. 2007
24. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. O Novo Modelo do Setor Elétrico. Brasília, 2003. Disponível em: <www.mme.gov.br>.acessado em 06 de setembro de 2008.
25. Opdal,O.A., Skreiberg, O., Production of synthetic biodiesel via Fischer-Tropsch synthesis. Noruega, 2006
26. Renew, Renewable fuels for advanced powertrains final report, 2008
27. Rocha, J.D, Tema 1: Pré-Tratamento apresentado em workshop Tecnológico sobre BTL (biomass-to-liquid), Brasil, 2008.
28. Rodrigues, R.C, Bomtempo, J.V., Comparação Técnico-Econômica das alternativas tecnológicas para processos GTL, 2004.
29. Rudloff M. (CHOREN Industries GmbH), “Biomass to liquids (Btl) from the Carbo-V@process: Technology and the latest developments”, Proceedings of the 2nd WorldConference and Technology Exhibition “Biomass for Energy, Industry and

ClimateProtection”, Roma, 2004

30. Souza, Z.J., Geração Elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação, UFSCar, 2003
31. Tjimensen, M.J.A, Faaij, A.P.C, Hamelinck, C.N, Hardeveld, M.R.M., Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification, 2002, Disponível em: <www.elsevier.com/locate/biombioe>. Acessado em: 07 de julho de 2008
32. UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo). Açúcar e álcool do Brasil – Commodities da Energia e do Meio Ambiente, São Paulo, 2004.
33. UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo). Ranking de Produção de Cana, Açúcar e Álcool – Região Centro-Sul – Safra 2005/2006. São Paulo, 2006. Disponível em <<http://www.portalunica.com.br/files/estatisticas/>>. Acessado em: 28 de agosto de 2008
34. Valor Econômico, Programa do biodiesel ainda esbarra no aumento de custo. Publicado por Eco&Ação. Disponível em: <http://www.ecoeacao.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=5920&Itemid=5>. Acessado em: 30 de agosto de 2008
35. Wolf B., (Choren Industries GmbH), “Bio-Methanol as a Fuel Available Sources”, 2002 Disponível em: <http://www.choren.de/admin/download/2EUROSOLAR-Konferenzeng_from_Regional>. Acesso em: 02 de agosto de 2008

Anexo A

Investimento Total Matéria-Prima Herbácea

| Planta com Capacidade de 500 MW de biomassa | Custos com equipamentos em MR\$ retirados da literatura | R (fator de escala) | Escala do equipamento na literatura | capacidade do equipamento a ser instalada | Número de equipamentos | custo do equipamento em MR\$ | Fonte |
|---|---|---------------------|-------------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------|
| Tratamento da biomassa | | | | | | | |
| Armazenamento | 2,784 | 0,65 | 33,5 | 148 | | 7,312404738 | Renew,2008 |
| Transporte | 0,984 | 0,8 | 33,5 | 148 | | 3,229747904 | Renew,2008 |
| secagem | 20,4 | 0,8 | 33,5 | 29,6 | | 18,47683968 | Renew,2008 |
| sistema de alimentação | 1,152 | 1 | 33,5 | 148 | | 5,089432836 | Renew,2008 |
| reator de prillolise | | | | | | 108,336 | Renew,2008 |
| Total | | | | | | 142,4444252 | |
| Gaseificação | | | | | | | |
| Gaseificador EF | 61,2 | 0,7 | 250 | 250 | 2 | 61,2 | Tjimensen,2002 |
| Total | | | | | | 122,4 | |
| Purificação do gás | | | | | | | |
| scrubber (Fe(OH ₂)) | 6,168 | 0,7 | 69,54 | 500 | | 24,53912583 | Boerrigte,2006 |
| Scrubber | 6,168 | 0,7 | 69,54 | 500 | | 24,53912583 | Tjimensen,2002 |
| Total | | | | | | 49,07825167 | |
| Acondicionamento de gás | | | | | | | |
| reator WGW | 29,28 | 0,65 | 8819 | 5092 | | 20,48924504 | Boerrigte,2006 |
| Selexol removido de CO ₂ | 151,2 | 0,7 | 9909 | 2130 | | 51,54619753 | Knoef, 2005 |
| Coluna de adsorção por ZnO | 0,312 | 1 | 367 | 500 | | 0,42506812 | Tjimensen,2002 |
| reforma a vapor | 22,56 | 0,6 | 1390 | 113 | | 5,004691148 | Tjimensen,2002 |
| PSA (Pressure-Swing Adsorption) | 78,24 | 0,7 | 9600 | 113 | | 3,491354028 | Tjimensen,2002 |
| Total | | | | | | 80,95655587 | |
| Síntese | | | | | | | |
| reator FT | 60,72 | 1 | 93,4 | 268 | | 174,2286938 | Boerrigte,2006 |
| Total | | | | | | 174,2286938 | |
| Upgrading | | | | | | | |

| Planta com Capacidade de 500 MW de biomassa | Custos com equipamentos em MR\$ retirados da literatura | R (fator de escala) | Escala do equipamento na literatura | capacidade do equipamento a ser instalada | Número de equipamentos | custo do equipamento em MR\$ | Fonte |
|---|---|---------------------|-------------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------|
| hidrocraqueamento | 1200 | 0,7 | 250 | 18,103 | | 191,0067108 | Renew,2008 |
| retificação | 12 | 0,7 | 20 | 22 | | 12,82791654 | Renew,2008 |
| total | | | | | | 203,8346273 | |
| Utilidades | | | | | | | |
| Geração de vapor | 8,112 | 0,8 | 47,5 | 159,4 | | 21,36799178 | Tjimensen,2002 |
| Turbina a vapor | 21,312 | 0,7 | 36,3 | 36,3 | | 21,312 | Renew,2008 |
| ASU | 109,68 | 0,5 | 76,6 | 45,9 | | 84,90228911 | Boerrigte,2006 |
| tratamento de rejeitos aquosos | 0,504 | 1 | 75 | 500 | | 3,36 | Hamelinck,2008 |
| Soma | | | | | | 130,9422809 | |
| ISBL | | | | | | 903,8848347 | |
| Fator de implementação | | | | | | 1,54 | |
| Investimento Total | | | | | | 1391,982645 | |

Investimento Total Matéria-Prima Lenhosa

| Planta com Capacidade de 500 MW de biomassa | Custos com equipamentos em MR\$ retirados da literatura | R (fator de escala) | Escala do equipamento na literatura | capacidade do equipamento a ser instalada | Número de equipamentos | custo do equipamento em MR\$ | Fonte |
|--|---|---------------------|-------------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------|
| Tratamento da biomassa | | | | | | | |
| Armazenamento | 2,784 | 0,65 | 33,5 | 148 | | 7,312404738 | Renew,2008 |
| Transporte | 0,984 | 0,8 | 33,5 | 148 | | 3,229747904 | Renew,2008 |
| equipamento para transformação da madeira em chips | 1,152 | 0,6 | 33,5 | 25 | 5 | 4,832363601 | Renew,2008 |
| Secagem | 20,4 | 0,8 | 33,5 | 29,6 | 5 | 92,38419842 | Renew,2008 |
| sistema de alimentação | 1,152 | 1 | 33,5 | 148 | | 5,089432836 | Renew,2008 |
| Total | | | | | | 112,8481475 | |
| Gaseificação | | | | | | | |
| Gaseificador EF | 61,2 | 0,7 | 250 | 250 | 2 | 61,2 | Tjimensen,2002 |
| Total | | | | | | 122,4 | |
| Purificação do gás | | | | | | | |
| scrubber (Fe(OH ₂)) | 6,168 | 0,7 | 69,54 | 500 | | 24,53912583 | Boerrigte,2006 |
| Scrubber | 6,168 | 0,7 | 69,54 | 500 | | 24,53912583 | Tjimensen,2002 |
| Total | | | | | | 49,07825167 | |
| Acondicionamento de gás | | | | | | | |
| reator WGW | 29,28 | 0,65 | 8819 | 5092 | | 20,48924504 | Boerrigte,2006 |
| Selexol removido de CO ₂ | 151,2 | 0,7 | 9909 | 2130 | | 51,54619753 | Knoef, 2005 |
| Coluna de adsorção por ZnO | 0,312 | 1 | 367 | 500 | | 0,42506812 | Tjimensen,2002 |
| reforma a vapor | 22,56 | 0,6 | 1390 | 113 | | 5,004691148 | Tjimensen,2002 |
| PSA (Pressure-Swing Adsorption) | 78,24 | 0,7 | 9600 | 113 | | 3,491354028 | Tjimensen,2002 |
| Total | | | | | | 80,95655587 | |
| Síntese | | | | | | | |
| reator FT | 60,72 | 1 | 93,4 | 268 | | 174,2286938 | Boerrigte,2006 |
| Total | | | | | | 174,2286938 | |
| Upgrading | | | | | | | |

| Planta com Capacidade de 500 MW de biomassa | Custos com equipamentos em MR\$ retirados da literatura | R (fator de escala) | Escala do equipamento na literatura | capacidade do equipamento a ser instalada | Número de equipamentos | custo do equipamento em MR\$ | Fonte |
|---|---|---------------------|-------------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------|
| Hidrocraqueamento | 1200 | 0,7 | 250 | 18,103 | | 191,0067108 | Renew,2008 |
| Retificação | 12 | 0,7 | 20 | 22 | | 12,82791654 | Renew,2008 |
| Total | | | | | | 203,8346273 | |
| Utilidades | | | | | | | |
| Geração de vapor | 8,112 | 0,8 | 47,5 | 159,4 | | 21,36799178 | Tjimensen,2002 |
| Turbina a vapor | 21,312 | 0,7 | 36,3 | 36,3 | | 21,312 | Renew,2008 |
| ASU | 109,68 | 0,5 | 76,6 | 45,9 | | 84,90228911 | Boerrigte,2006 |
| tratamento de rejeitos aquosos | 0,504 | 1 | 75 | 500 | | 3,36 | Hamelinck,2008 |
| Soma | | | | | | 130,9422809 | |
| ISBL | | | | | | 874,2885571 | |
| Fator de implementação | | | | | | 1,54 | |
| Investimento Total | | | | | | 1346,404378 | |

Investimento Total Matéria-Prima 50% Herbácea+50%Lenhosa

| Planta com Capacidade de 500 MW de biomassa | Custos com equipamentos em MR\$ retirados da literatura | R (fator de escala) | Escala do equipamento na literatura | capacidade do equipamento a ser instalada | Número de equipamentos | custo do equipamento em MR\$ | Fonte |
|--|---|---------------------|-------------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------|
| Tratamento da biomassa | | | | | | | |
| Armazenamento | 2,784 | 0,65 | 33,5 | 148 | | 7,312404738 | Renew,2008 |
| Transporte | 0,984 | 0,8 | 33,5 | 148 | | 3,229747904 | Renew,2008 |
| equipamento para transformação da madeira em chips | 1,152 | 0,6 | 33,5 | 25 | 3 | 2,899418161 | Renew,2008 |
| Secagem | 20,4 | 0,8 | 33,5 | 29,6 | 5 | 92,38419842 | Renew,2008 |
| Pirolise | | | | | 3 | 65,0016 | Renew,2008 |
| sistema de alimentação | 1,152 | 1 | 33,5 | 148 | | 5,089432836 | |
| Total | | | | | | 175,9168021 | |
| Gaseificação | | | | | | | Tjimensen,2002 |
| Gaseificador EF | 61,2 | 0,7 | 250 | 250 | 2 | 61,2 | |
| Total | | | | | | 122,4 | |
| Purificação do gás | | | | | | | Boerrigte,2006 |
| scrubber (Fe(OH2)) | 6,168 | 0,7 | 69,54 | 500 | | 24,53912583 | Tjimensen,2002 |
| Scrubber | 6,168 | 0,7 | 69,54 | 500 | | 24,53912583 | |
| Total | | | | | | 49,07825167 | |
| Acondicionamento de gás | | | | | | | Boerrigte,2006 |
| reator WGW | 29,28 | 0,65 | 8819 | 5092 | | 20,48924504 | Knoef, 2005 |
| Selexol removido de CO2 | 151,2 | 0,7 | 9909 | 2130 | | 51,54619753 | Tjimensen,2002 |
| Coluna de adsorção por ZnO | 0,312 | 1 | 367 | 500 | | 0,42506812 | Tjimensen,2002 |
| reforma a vapor | 22,56 | 0,6 | 1390 | 113 | | 5,004691148 | Tjimensen,2002 |
| PSA (Pressure-Swing Adsorption) | 78,24 | 0,7 | 9600 | 113 | | 3,491354028 | |
| Total | | | | | | 80,95655587 | |
| Síntese | | | | | | | Boerrigte,2006 |
| reator FT | 60,72 | 1 | 93,4 | 268 | | 174,2286938 | |
| Total | | | | | | 174,2286938 | |

| Planta com Capacidade de 500 MW de biomassa | Custos com equipamentos em MR\$ retirados da literatura | R (fator de escala) | Escala do equipamento na literatura | capacidade do equipamento a ser instalada | Número de equipamentos | custo do equipamento em MR\$ | Fonte |
|---|---|---------------------|-------------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------|
| Upgrading | | | | | | | |
| Hidrocraqueamento | 1200 | 0,7 | 250 | 18,103 | | 191,0067108 | Renew,2008 |
| Retificação | 12 | 0,7 | 20 | 22 | | 12,82791654 | Renew,2008 |
| Total | | | | | | 203,8346273 | |
| Utilidades | | | | | | | |
| Geração de vapor | 8,112 | 0,8 | 47,5 | 159,4 | | 21,36799178 | Tjimensen,2002 |
| Turbina a vapor | 21,312 | 0,7 | 36,3 | 36,3 | | 21,312 | Renew,2008 |
| ASU | 109,68 | 0,5 | 76,6 | 45,9 | | 84,90228911 | Boerrigte,2006 |
| tratamento de rejeitos aquosos | 0,504 | 1 | 75 | 500 | | 3,36 | Hamelinck,2008 |
| Soma | | | | | | 130,9422809 | |
| ISBL | | | | | | 937,3572116 | |
| Fator de implementação | | | | | | 1,54 | |
| Investimento Total | | | | | | 1443,530106 | |

Anexo B

Custo de Produção Matéria-Prima Herbácea

| | |
|------------------------|-------------|
| Custo com biomassa | R\$/t |
| Custo da matéria prima | 10 |
| custo de transporte | 163,1532424 |
| Custo Total | 173,1532424 |

| | |
|--|-------------|
| Custo da biomassa em R\$/GJ de biomassa sem custo de armazenamento | 9,566477481 |
| Custo de armazenagem | 88,85163453 |
| Custo de produção da biomassa por ano (R\$) | 143374454,4 |
| Custo médio da biomassa em R\$/GJ de biomassa | 9,956559337 |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo com biomassa (R\$/GJ de diesel) | 25,52963933 |

| | |
|--|-------------|
| Custo com operação | R\$ |
| Custo com pessoal | 695991,3227 |
| Custo operação e serviços | 69599132,27 |
| Custo total com operação | 70295123,6 |
| Custo de produção do diesel referente a custos com produção (R\$/GJ de diesel) | 12,51693796 |

| | |
|---------------|-------------|
| Outros Custos | (R\$) |
| Seguro | 13919826,45 |
| Administração | 6959913,227 |
| Contingências | 13919826,45 |
| Outros* | 10439869,84 |
| Custo total | 45239435,98 |

| | |
|--|-------------|
| Custo de produção de diesel referente a outros custos (R\$/GJ de diesel) | 8,055455124 |
|--|-------------|

| | |
|------------------------------|-------------|
| Custos referentes ao capital | |
| Depreciação | 16,09481543 |

| | |
|---|------------------------------|
| Custos referentes a revenda de sub-produtos | |
| Produto | quantidade produzida por ano |
| Nafta (GJ) | 2059200 |
| Cuto de produção de diesel referente a revenda (R\$/GJ de diesel) | -8,572616323 |

| | | | | |
|--|--|------------------|------------------------------|--------------------------|
| Custos referentes a consumo de outros insumos | | | | |
| Fonte | *Todos os dados são provenientes de tabelas preenchidas pela Choren para elaboração de análises de LCA (life cycle analyses) realizados pelo projeto Renew | | | |
| | **Preços retirados de Institute for Energy and Environment "Conversion Cost Calculation", 2007 | | | |
| Matéria-prima consumida (un.) | quantidade consumida por hora * | Preço** (R\$/um) | quantidade consumida por ano | custo (R\$/GJ de diesel) |
| Gás Natural (MW) | 0,223611111 | 96 | 1788,888889 | 0,030579 |
| Água (rejeito) (kg) | 125000 | 0,005184 | 1000000000 | 0,923077 |
| NAOH (kg) | 850 | 0,372 | 6800000 | 0,450427 |
| cinza no filtro (kg) | 272 | 0,072 | 2176000 | 0,027897 |
| cinza (kg) | 6716,5 | 0,12 | 53732000 | 1,14812 |
| lama (kg) | 583 | 0,144 | 4664000 | 0,11959 |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo de outras matérias-primas | | | | 2,69969 |

| Custo de produção do diesel | R\$/GJ de diesel | % |
|--|------------------|-------------|
| Custo de produção do diesel referente ao consumo com biomassa (R\$/GJ de diesel) | 25,53 | 45% |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo de outras matérias-primas | 2,70 | 5% |
| Custo de produção do diesel referente a custos com produção (R\$/GJ de diesel) | 12,52 | 22% |
| Custo de produção de diesel referente a outros custos (R\$/GJ de diesel) | 8,06 | 14% |
| Depreciação | 16,09 | 29% |
| Custo de produção de diesel referente a revenda (R\$/GJ de diesel) | -8,57 | -15% |
| Custo Total de produção do diesel | 56,32 | 100% |

Custo de Produção Matéria-Prima Lenhosa

| Custo com biomassa | R\$/t |
|------------------------|-------------|
| Custo da matéria prima | 115 |
| custo de transporte | 46,71403636 |
| Custo Total | 161,7140364 |

| | |
|------------------------------|-------------|
| Custos referentes ao capital | |
| Depreciação | 16,69083354 |

| Custos referentes a revenda de sub-produtos | |
|---|------------------------------|
| Produto | quantidade produzida por ano |
| Nafta (GJ) | 2059200 |
| Cuto de produção de diesel referente a revenda (R\$/GJ de diesel) | -8,572616323 |

| | |
|--|-------------|
| Custo da biomassa em R\$/GJ de biomassa sem custo de armazenamento | 8,327190338 |
| Custo de armazenagem | 25,44 |
| Custo de produção da biomassa por ano (R\$) | 123905028 |
| Custo médio da biomassa em R\$/GJ de biomassa | 8,604515832 |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo com biomassa (R\$/GJ de diesel) | 22,06286111 |

| Custo com operação | R\$ |
|--|-------------|
| Custo com pessoal | 673202,1889 |
| Custo operação e serviços | 67320218,89 |
| Custo total com operação | 67993421,08 |
| Custo de produção do diesel referente a custos com produção (R\$/GJ de diesel) | 12,10709065 |

| Outros Custos | (R\$) |
|--|-------------|
| Seguro | 13464043,78 |
| Administração | 6732021,889 |
| Contigências | 13464043,78 |
| Outros* | 10098032,83 |
| Custo total | 43758142,28 |
| Custo de produção de diesel referente a outros custos (R\$/GJ de diesel) | 7,791692002 |

| | | | | |
|---|--|------------------|------------------------------|--------------------------|
| Custos referentes a consumo de outros inputs | | | | |
| Fonte | *Todos os dados são provenientes de tabelas preenchidas pela Choren para elaboração de análises de LCA (life cycle analyses) realizados pelo projeto Renew | | | |
| | **Preços retirados de Institute for Energy and Environment "Conversion Cost Calculation", 2007 | | | |
| Matéria-prima consumida (un.) | quantidade consumida por hora * | Preço** (R\$/um) | quantidade consumida por ano | custo (R\$/GJ de diesel) |
| Gás Natural (MW) | 0,223611111 | 96 | 1788,888889 | 0,030579 |
| Água (rejeito) (kg) | 125000 | 0,005184 | 1000000000 | 0,923077 |
| NAOH (kg) | 4,05 | 0,372 | 32400 | 0,002146 |
| cinza no filtro (kg) | 272 | 0,072 | 2176000 | 0,027897 |
| cinza (kg) | 1966,5 | 0,12 | 15732000 | 0,336154 |
| lama (kg) | 18,8 | 0,144 | 150400 | 0,003856 |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo de outras matérias-primas | | | | 1,32371 |

| Custo de produção do diesel | R\$/GJ | % |
|--|--------------|-------------|
| Custo de produção do diesel referente ao consumo com biomassa (R\$/GJ de diesel) | 22,06 | 44% |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo de outras matérias-primas | 1,32 | 3% |
| Custo de produção do diesel referente a custos com produção (R\$/GJ de diesel) | 12,11 | 24% |
| Custo de produção de diesel referente a outros custos (R\$/GJ de diesel) | 7,79 | 15% |
| Custo referentes ao capital | 15,57 | 31% |
| Custo de produção de diesel referente a venda (R\$/GJ de diesel) | -8,57 | -17% |
| Custo Total de produção do diesel | 50,28 | 100% |

Custo de Produção Matéria-Prima Lenhosa

| | |
|-----------------------------------|-------------|
| Custo da matéria prima (lenhosa) | 115 |
| Custo da matéria-prima (herbácea) | 10 |
| custo de transporte | 104,9336394 |
| Custo Total para 500 MW | 224,5794566 |

| | |
|---|-------------|
| Custo da biomassa em R\$/GJ de biomassa | 11,56433865 |
| Custo de armazenagem | 57,14581727 |
| Custo de produção da biomassa por ano (R\$) | 172444568,9 |
| Custo da biomassa em R\$/GJ de biomassa | 11,97531729 |

| | |
|--|-------------|
| Custo de produção do diesel referente ao consumo com biomassa (R\$/GJ de diesel) | 30,70594176 |
|--|-------------|

| | |
|--|-------------|
| Custo com operação | R\$ |
| Custo com pessoal | 721765,053 |
| Custo operação e serviços | 72176505,3 |
| Custo total com operação | 72898270,35 |
| Custo de produção do diesel referente a custos com produção (R\$/GJ de diesel) | 12,98046124 |

| | |
|--|-------------|
| Outros Custos | (R\$) |
| Seguro | 14435301,06 |
| Administração | 7217650,53 |
| Contingências | 14435301,06 |
| Outros* | 10826475,79 |
| Custo total | 46914728,44 |
| Custo de produção de diesel referente a outros custos (R\$/GJ de diesel) | 8,353762187 |

| | |
|------------------------------|-------------|
| Custos referentes ao capital | |
| Depreciação | 15,56781619 |

| | |
|---|------------------------------|
| Custos referentes a revenda de sub-produtos | |
| Produto | quantidade produzida por ano |
| Nafta (GJ) | 2059200 |
| Cuto de produção de diesel referente a revenda (R\$/GJ de diesel) | -8,572616323 |

| | | | | |
|--|--|------------------|------------------------------|--------------------------|
| Custos referentes a consumo de outros inputs | | | | |
| Fonte | *Todos os dados são provenientes de tabelas preenchidas pela Choren para elaboração de análises de LCA (life cycle analyses) realizados pelo projeto Renew | | | |
| | **Preços retirados de Institute for Energy and Enviroment "Conversion Cost Calculation", 2007 | | | |
| Matéria-prima consumida (un.) | quantidade consumida por hora * | Preço** (R\$/um) | quantidade consumida por ano | custo (R\$/GJ de diesel) |
| Gás Natural (MW) | 0,223611111 | 0,030579 | 0,030579 | 0,030579 |
| Água (rejeito) (kg) | 125000 | 0,923077 | 0,923077 | 0,923077 |
| NAOH (kg) | 427,025 | 0,226287 | 0,226287 | 0,226287 |
| cinza no filtro (kg) | 272 | 0,027897 | 0,027897 | 0,027897 |
| cinza (kg) | 4341,25 | 0,742094 | 0,742094 | 0,742094 |
| lama (kg) | 300,9 | 0,061723 | 0,061723 | 0,061723 |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo de outras matérias-primas | | | | 2,011658 |

| Custo de produção do diesel | R\$/GJ | % |
|--|--------------|-------------|
| Custo de produção do diesel referente ao consumo com biomassa (R\$/GJ de diesel) | 30,71 | 49% |
| Custo de produção do diesel referente ao consumo de outras matérias-primas | 2,01 | 3% |
| Custo de produção do diesel referente a custos com produção (R\$/GJ de diesel) | 12,98 | 21% |
| Custo de produção de diesel referente a outros custos (R\$/GJ de diesel) | 8,35 | 13% |
| Custo referentes ao capital | 16,69 | 27% |
| Cuto de produção de diesel referente a revenda (R\$/GJ de diesel) | -8,57 | -14% |
| Custo Total de produção do diesel | 62,17 | 100% |