

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA DE PLANTAS PRODUTORAS
DE ÁLCOOL, BIODIESEL E ENERGIA ELÉTRICA**

Caio Sérgio Zamunaro

**São Paulo
2008**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA DE PLANTAS PRODUTORAS
DE ÁLCOOL, BIODIESEL E ENERGIA ELÉTRICA**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Caio Sérgio Zamunaro

**Orientador: Prof. Silvio de Oliveira
Júnior**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2008**

FICHA CATALOGRÁFICA

Zamunaro, Caio Sérgio Bochetti

Análise exergética e termoeconômica de plantas produtoras de álcool, biodiesel e energia elétrica / C.S.B. Zamunaro. – São Paulo, 2008.

p. 95

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Biocombustíveis 2.Cogeração de energia elétrica 3.Custo econômico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Sílvio de Oliveira Júnior pela orientação ao longo do trabalho e ao Luiz Pellegrini por ter demonstrado prontidão e boa vontade no atendimento.

Agradeço especialmente à minha família e a meus amigos pelo apoio, dedicação e compreensão sempre presentes.

RESUMO

Com base na incerteza dos preços e da disponibilidade futura do petróleo, e nas altas emissões de poluentes derivadas de sua queima como fonte energética, o mundo procura alternativas viáveis para diversificar sua matriz energética e reduzir sua dependência dos combustíveis fósseis. O Brasil, neste aspecto, larga na frente com uma já consolidada indústria alcooleira e com base no consolidado desenvolvimento do biodiesel. É neste contexto se insere o presente trabalho que irá avaliar sob a óptica exergética e termoeconômica plantas que produzem tanto álcool proveniente da cana de açúcar como biodiesel.

Neste texto, são primeiramente abordados aspectos gerais relacionados a ambos os combustíveis. Ainda, munindo-se de conceitos da termodinâmica clássica e da termoeconomia, é proposto e simulado um modelo de integração dos processos através de uma planta de utilidades que também tem por objetivo utilizar o vapor gerado na produção e posterior venda de energia elétrica excedente. Posteriormente são analisados os custos das utilidades vapor e energia e considerando o investimento inicial necessário e os demais custos inerentes ao processo de fabricação dos combustíveis, é feita uma análise em que se pretende apontar uma faixa de operação da planta que retorne a maior margem bruta.

ABSTRACT

Due to the uncertainty of the price and the availability of the oil in the future and the impacts of its combustion to the environment, the world is looking for alternative ways to produce energy. In this aspect, Brazil takes a leadership position with a solid sugarcane ethanol industry and with positive results shown in the development of the biodiesel. Based on this scenario, this work presents a model of a combined cycle plant that produces both sugarcane ethanol and biodiesel for a further thermoeconomic and exergetic analysis.

Firstly, general concepts about the fuels are discussed, introducing important parameters about their production. After that, concepts related to the classic thermodynamics and thermoeconomics are revised and used to build a utility plant model in which the process of production of the biodiesel and ethanol are integrated. This plant has also the capacity to produce and sell electrical energy by using the excess of steam generated in the boiler. Furthermore, the costs of the steam, electric energy and the fuels are analyzed and it is presented a plant operation configuration where the gross margin is higher.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. O PROBLEMA	3
2.1. Aspectos Relativos aos Biocombustíveis	3
2.2. Integração dos Processos de Álcool e Biodiesel	3
2.3. Revisão da Termodinâmica Clássica	3
2.4. Desenvolvimento de uma Planta de Utilidades.....	4
2.5. Análise Termoeconômica.....	4
2.6. Escolha de uma Configuração Melhor para a Operação da Planta.....	4
3. ANÁLISE GERAL DOS BIOCOMBUSTÍVEIS	5
3.1. O pioneirismo Brasileiro na Área dos Biocombustíveis – Álcool	6
3.2. O Biodiesel	8
3.2.1. Entraves na Produção de Biodiesel	9
4. REVISÃO TERMODINÂMICA	12
4.1. A Primeira Lei da Termodinâmica	12
4.1.1. Entalpia	16
4.1.2. Conservação da Massa e o Volume de Controle	17
4.1.3. A Primeira Lei para Volumes de Controle	18
4.1.4. A Primeira Lei para Regime Permanente	20
4.2. A segunda Lei da Termodinâmica.....	21
4.2.1. A desigualdade de Clausius.....	21
4.2.2. Entropia	22
4.2.3. A Segunda Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle	23
4.2.4. O Processo em Regime Permanente	24
5. CICLO DE POTÊNCIA	25
5.1. Equipamentos Térmicos	25
5.1.1. Gerador de Vapor	25
5.1.2. Condensador	26
5.1.3. Turbina	26

5.1.4.	Bombas	27
5.2.	Introdução aos Ciclos de Potência	27
5.3.	O Ciclo de Rankine	28
6.	INTRODUÇÃO À TERMOECONOMIA	31
6.1.	Fundamentos da Análise Termoeconômica	31
6.1.1.	Análise Exergética	31
6.1.2.	Análise Econômica de Equipamentos	33
6.1.3.	Custeio Exergético.....	33
7.	MODELOS PARA A PRODUÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS.....	36
7.1.	Modelo para a Produção do Álcool	36
7.1.1.	Parâmetros para a produção do álcool	37
7.2.	Modelo para a Produção de Biodiesel	38
7.2.1.	Escolha do óleo vegetal a ser utilizado na produção do biodiesel.....	38
7.2.2.	Parâmetros necessários para a produção de biodiesel	39
8.	PLANTA DE UTILIDADES.....	40
8.1.	Geração de Vapor	40
8.2.	Geração de Energia Elétrica	41
9.	EQUACIONAMENTO MÁSSICO, ENERGÉTICO E EXERGÉTICO	43
9.1.	Hipóteses Adotadas	43
9.2.	Balancos de Massa e Energia	44
9.2.1.	Moenda.....	44
9.2.2.	Caldeira.....	44
9.2.3.	Turbina de Extração de Contra Pressão.....	45
9.2.4.	Desaerador/Dessuper/Processo	46
9.2.5.	Turbina de Condensação.....	47
9.2.6.	Condensador	48
9.2.7.	Processo	50
9.2.8.	Desaerador	51
9.2.9.	Bomba da Caldeira	51
9.2.10.	Equacionamento Global da Planta de Utilidades.....	53
9.3.	Análise Exergética	53
10.	CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS.....	56

10.1.1.	Custo dos equipamentos	56
10.1.2.	Balanços de Custos dos Equipamentos	57
11.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PLANTA DE UTILIDADES	60
11.1.	Parâmetros relativos à produção de álcool.....	60
11.2.	Parâmetros para a Produção de Biodiesel.....	60
11.3.	Consumo das Utilidades	61
11.4.	Parâmetros relativos à Planta de Utilidades.....	62
12.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	63
12.1.	Resultados Gerais da Planta	63
12.2.	Resultados da Análise Exergética	64
12.3.	Resultados dos Custos dos Equipamentos	65
13.	CUSTOS.....	68
13.1.	Custos Relativos à Planta de Utilidades.....	68
13.2.	Custos Relativos à produção do Álcool	69
13.3.	Custos Relativos à produção do Biodiesel.....	71
14.	CONFIGURAÇÕES DA PLANTA	73
14.1.	Cenários Alternativos da Configuração da Planta	73
14.2.	Maximização da Margem	74
14.2.1.	Receita Bruta	74
14.2.2.	Custos Relacionados	76
14.2.3.	Margem Bruta	77
15.	DISCUSSÃO.....	79
16.	REFERÊNCIAS	81
16.1.	Anexo A	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1 – Fluxograma da produção de biodiesel.....	9
Figura 3. 2 – Fluxograma da produção de biodiesel.....	11
Figura 5. 1 – Ciclo de Potência baseado em quatro processos	28
Figura 5. 2 – Unidade produtora de vapor baseada em um ciclo de Rankine.....	29
Figura 5. 3 – Diagrama T-s do ciclo de Rankine	29
Figura 6. 1 – Balanço de exergia para um volume de controle.....	31
Figura 7. 1 – Fluxograma da produção de álcool.....	36
Figura 7. 2 – Fluxograma da produção de biodiesel.....	38
Figura 8. 1 – Planta de Utilidades	40
Figura 9. 1 – Pontos do Sistema.....	43
Figura 9. 2 – Fluxos na Caldeira	45
Figura 9. 3 – Fluxos na Turbina de Contra Pressão	45
Figura 9. 4 – Fluxos na saída da Turbina de Contra Pressão	46
Figura 9. 5 – Esquema da Turbina de Condensação	47
Figura 9. 6 – Micro – Sistema do Condensador.....	48
Figura 9. 7 – Bomba do Condensador	50
Figura 9. 8 – Fluxos de vapor no processo	50
Figura 9. 9 – Fluxos no desaerador	51
Figura 9. 10 – Fluxos na bomba da caldeira	52
Figura 13. 1 – Composição dos custos do álcool.....	69
Figura 13. 2 – Composição dos custos do biodiesel	71
Figura 14. 1 – Esquema da planta	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 7. 1 – Parâmetros relativos à produção de álcool.....	37
Tabela 7. 2 – Parâmetros relativos à produção de biodiesel.	39
Tabela 11. 1 – Parâmetros relativos à produção de álcool.....	60
Tabela 11. 2 – Parâmetros relativos à produção de biodiesel.	61
Tabela 11. 3 – Consumos totais de utilidades.....	61
Tabela 12. 2 – Resultados Globais da Planta de Utilidades.....	63
Tabela 12. 3 – Exergias do sistema.....	64
Tabela 12. 4 – Irreversibilidades do Sistema.....	65
Tabela 12. 5 – Custo dos equipamentos.....	65
Tabela 12. 6 – Custo Termoeconômico (base energética).....	66
Tabela 12. 7 – Custo Termoeconômico (base mássica).....	67
Tabela 13. 1 – Custos das Utilidades da Planta de Utilidades.....	68
Tabela 13. 2 – Composição dos investimentos na Planta de Utilidades.	69
Tabela 13. 3 – Composição dos investimentos na Planta de Utilidades.	69
Tabela 13. 4 – Custo das Utilidades.....	70
Tabela 13. 5 – Investimento para o processo de produção de álcool.....	70
Tabela 13. 6 – Custo de Produção do Álcool.....	71
Tabela 13. 7 – Custo das Utilidades destinadas à produção de biodiesel.....	72
Tabela 13. 8 – Investimento para o processo de produção de biodiesel.....	72
Tabela 13. 9 – Custo de Produção de Biodiesel.....	72
Tabela 14. 1 – Cenário I.....	74
Tabela 14. 2 – Cenário II.....	74
Tabela 14. 3 – Cenário III.....	74
Tabela 14. 4 – Preço de venda.....	75
Tabela 14. 5 – Receita obtida através do Cenário I.....	75
Tabela 14. 6 – Receita obtida através do Cenário II.....	75
Tabela 14. 7 – Receita obtida através do Cenário III.....	76
Tabela 14. 8 – Custos relativos ao cenário I.....	76
Tabela 14. 9 – Custos relativos ao cenário II.....	77

Tabela 14. 10 – Custos relativos ao cenário III.....	77
Tabela 14. 11 – Margem Bruta do cenário I	77
Tabela 14. 12 – Margem Bruta do cenário II.....	78
Tabela 14. 13 – Margem Bruta do cenário III.....	78

NOMECLATURA UTILIZADA

Q = Calor	[kJ]
\dot{Q} = Fluxo de Calor	[kW]
W = Trabalho	[kJ]
\dot{W} = Potência	[kW]
\dot{m} = Vazão mássica	[kg/s ou t/ano]
h = Entalpia	[kJ/kg]
s = Entropia	[kJ/kg.K]
\dot{S} = Fluxo de entropia	[kW/K]
T = Temperatura	[K ou °C]
\dot{B} = Fluxo de exergia	[kW]
b = Exergia	[kJ/kg]
\dot{C} = Fluxo de custos	[US\$/s]
c = Custo Termoeconômico unitário	[US\$/kJ]
η = Eficiência	
p = Pressão	[kPa, bar ou atm]
C_p = Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.°C]
x = Título	
\dot{I} = Taxa de irreversibilidades	[kW]
i = Taxa de juros ao ano	
N = Tempo de vida da instalação	[anos]
PCI = Poder calorífico inferior	[kcal/kg]
FRC = Fator de recuperação de capital	

1. INTRODUÇÃO

A economia moderna está intimamente vinculada à capacidade dos países em produzirem energia. Desde a Segunda Revolução industrial datada do século XIX, a economia global depende do uso extensivo de recursos naturais para disponibilizar energia que fomenta o crescimento e o desenvolvimento das nações. Os combustíveis fósseis ainda são a principal fonte energética utilizada e, atualmente, no século XXI torna-se importante estudar os impactos da utilização dos recursos naturais, e fazer um planejamento de como será possível manter o ritmo de crescimento da economia em um patamar aceitável sem degradar e extinguir as fontes energéticas disponíveis. Isso implica em uma importante discussão que rodeia a sociedade: como aumentar a participação de combustíveis provenientes de fontes renováveis na matriz energética mundial, através de uma transição gradual sem que sejam sentidos efeitos da substituição. São fundamentos dessa discussão fatores econômicos e ambientais. No que tange à economia pode-se destacar a incerteza quanto à sua disponibilidade no futuro. Em relação ao ambiente, combustíveis fósseis apresentam riscos à sustentabilidade da planta, uma vez que sua queima aumenta a emissão de gases nocivos ao ambiente além de ser uma fonte considerada não renovável.

O Brasil sai na frente nessa corrida, uma vez que possui uma matriz energética menos dependente de fontes não renováveis de energia. O exemplo clássico desta afirmação é a grande quantidade de energia proveniente de hidrelétricas espalhadas pelo país. Também possui desde a década de 1970 um programa de incentivo à produção de etanol proveniente de cana de açúcar, na época devido às constantes altas no preço do petróleo no mercado internacional. Hoje o país se consolidou como o maior produtor deste tipo de álcool no mundo. Mesmo assim, como as demais economias globais, o Brasil ainda é extremamente dependente do uso do petróleo e seus derivados, tanto na indústria como no abastecimento da frota de veículos. Paralelamente à consolidação do etanol no cenário brasileiro está o desenvolvimento do biodiesel, combustível de origem vegetal que detém as mesmas propriedades do diesel regular derivado do petróleo. Neste contexto de transição e aprofundamento do estudo de novas fontes energéticas,

sem deixar de lado o fator econômico, pretende-se estudar sob a ótica da termoeconomia usinas que tem capacidade de produzir álcool e biodiesel.

2. O PROBLEMA

O objetivo do trabalho é analisar termoeconomicamente plantas de ciclo combinado para a produção de álcool e biodiesel e apontar uma configuração que seja economicamente mais interessante para a planta operar baseada na quantidade vendida de cada combustível. Para atingir essa meta, a seguir são relacionados os itens estudados e as atividades desenvolvidas.

2.1. Aspectos Relativos aos Biocombustíveis

São estudados diversos aspectos relativos ao biocombustível. Sua evolução e desenvolvimento no Brasil, começando pelo etanol derivado da cana de açúcar com a implementação do programa PROÁLCOOL, na década de 1970, passando pelos processos de obtenção deste combustível, chegando ao biodiesel, com os incentivos do governo a sua produção, a regulamentação, as matérias primas e os processos hoje utilizados para a obtenção do combustível. Para que seja possível a compreensão destes aspectos, são estudados artigos técnicos e estudos setoriais.

2.2. Integração dos Processos de Álcool e Biodiesel

Nesta parte o foco do trabalho se volta para aspectos técnicos relativos aos processos de obtenção de álcool e biodiesel. Cada processo é estudado separadamente sendo construídos modelos para a obtenção de cada combustível. Após o entendimento dos dois processos isoladamente, discute-se formas possíveis de se integrar os processos para o proveito dos mesmos insumos na produção dos dois combustíveis, teoricamente aumentando o rendimento da configuração.

2.3. Revisão da Termodinâmica Clássica

Serão revistos aspectos básicos da termodinâmica clássica como primeira e segunda lei da termodinâmica além de considerações a respeito dos ciclos de potencia. Esta revisão trás as ferramentas necessárias para a modelagem e desenvolvimento do problema proposto.

2.4. Desenvolvimento de uma Planta de Utilidades

Com os modelos de álcool e biodiesel já desenvolvidos, o entendimento de ciclos de potência, o equacionamento derivado da revisão da termodinâmica clássica os parâmetros relativos à obtenção dos combustíveis já quantificados e com a fluência junto ao software EES adquirida, pode-se propor um modelo de integração da produção de ambos os combustíveis com geração paralela de energia elétrica para venda.

2.5. Análise Termoeconômica

Revisão bibliográfica a respeito de exergia e termoeconomia. A partir destes conceitos é realizada a análise termoeconômica da planta de utilidades, já neste ponto simulada, apontando-se os custos de vapor e eletricidade, além dos custos associados à produção de álcool e biodiesel.

2.6. Escolha de uma Configuração Melhor para a Operação da Planta

Com os custos relativos à planta quantificados, são definidos cenários distintos de operação, com diferentes quantidades de combustíveis produzidas, e com base no critério de minimização dos custos, será definido um melhor modo de operação da planta.

3. ANÁLISE GERAL DOS BIOCOMBUSTÍVEIS

A expectativa de diminuição das reservas de petróleo com a possibilidade da escassez do mesmo, aliada à crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, que tem sofrido um aumento do nível de poluentes, notadamente pelo gás carbônico (CO₂) – maior responsável pelo efeito estufa – em parte pela contribuição das emissões de gases pelos motores movidos a combustíveis fósseis, tem incentivado visando à sua substituição. A principal característica da matriz energética brasileira reside na elevada porcentagem (para os padrões mundiais) de energia renovável. Cerca de 45% da oferta interna de energia no Brasil é composta por fontes de energia renováveis. Enquanto isto, na oferta mundial de energia, a energia renovável representa pouco mais que 13% (TRIELLI, POÇO, BONOMI, 2006).

Uma importante parcela destas fontes renováveis de energia que compõem a matriz brasileira é representada pelos biocombustíveis (cerca de 8% da oferta interna de energia total), representados hoje pelo álcool combustível produzido a partir da cana-de-açúcar e que apresentou um aumento de 7,7% na sua produção, no ano de 2005. Biocombustíveis podem, em princípio ser definidos como os combustíveis produzidos a partir de biomassas agrícolas, sendo por isso renováveis e, por substituir combustíveis fósseis, reduzir a emissão de gases de efeito estufa, em função da absorção do CO₂ atmosférico que ocorre na produção da biomassa. A produção e o consumo de biocombustíveis no Brasil deverão ganhar notável avanço na sua importância, com a consolidação do recém criado Programa Brasileiro de Biodiesel, que já apresentou uma produção de cerca de 700 mil litros, para uma capacidade instalada de 85 milhões de litros/ano em 2005, primeiro ano da sua existência. Um novo salto na oferta de biocombustíveis deverá ocorrer com o desenvolvimento das tecnologias de aproveitamento energético da biomassa. Uma vez superadas as barreiras tecnológicas para o aproveitamento energético integral da biomassa, o Brasil consolidará ainda mais seu lugar de destaque no mundo na produção de biocombustíveis renováveis, em função da grande disponibilidade de terra adequada para a agricultura (TRIELLI, POÇO, BONOMI, 2006).

3.1. O pioneirismo Brasileiro na Área dos Biocombustíveis – Álcool

O sistema agroindustrial da cana-de-açúcar é um dos mais antigos e importantes do País, estando ligado diretamente aos principais eventos históricos do Brasil. São amplamente conhecidos a importância e o impacto que o Programa Brasileiro de Álcool Combustível – PROALCOOL teve no Brasil. Idealizado após o primeiro choque do petróleo, em 1972, o programa apresentava vantagens econômicas e sociais importantes para o País naquele momento.

Do ponto de vista estratégico, o agronegócio da cana-de-açúcar depara-se hoje com um conjunto importante de oportunidades, principalmente no que se refere à produção do álcool:

- aumento do preço do petróleo no curto prazo;
- esgotamento dos combustíveis fósseis no médio e longo prazo;
- cana-de-açúcar é reconhecida mundialmente como a matéria-prima por excelência para produção de energia renovável;
- crescimento da demanda por energia renovável: álcool combustível, biodiesel e biomassa;
- álcool consolidando-se como commodity mundial com demanda em contínuo crescimento;
- perspectiva de expansão significativa da produção sem aumento da área plantada, pela via da inovação tecnológica;
- necessidade do estabelecimento de maior controle ambiental;
- solução dos impactos de curto prazo gerados pelo crescimento da demanda: aumento da produção de cana-de-açúcar;
- deslocamento de culturas de alimentos e pastagens;
- abertura de mercado para exportação de álcool combustível;
- reestruturação da cadeia produtiva, entre outros.

O PROALCOOL é considerado o maior programa mundial de energia renovável. O sucesso do programa pode ser confirmado por alguns fatos: o Brasil disputa com os Estados Unidos o lugar de maior produtor de etanol no mundo – 16 milhões de m³ em 2005, produzido a partir da cana de açúcar, ocupando cerca de 2% da área agricultável do País (considerando apenas a fração de cana plantada, destinada à produção de álcool); as significativas e consistentes reduções observadas

no custo de produção do etanol (curva de aprendizado) durante os 25 anos de existência do Programa, sendo hoje inferior a US\$ 0,20 por litro; os avanços tecnológicos na utilização do etanol como combustível em motores ciclo Otto, tanto nos motores dedicados, quanto nos modernos veículos flex-fuel (TRIELLI, POÇO, BONOMI, 2006).

Uma visão realista projeta a necessidade de dobrar a produção de álcool brasileiro nos próximos 5-10 anos. Este importante salto de produção, que começa a se tornar realidade através da implantação de novas usinas, abrindo novas fronteiras agrícolas para a cana-de-açúcar, exigirá, paralelamente, um esforço concentrado na busca de um aumento significativo na produtividade alcançada em litros de álcool produzido por hectare-ano de cana plantada. Este aumento poderá ser alcançado através de duas rotas tecnológicas. A primeira rota tem seu foco voltado para a área agrícola e buscará, através da ampliação do atual programa de introdução de novas variedades de cana e, futuramente, através do emprego da cana transgênica, estender e, se possível potencializar, o atual nível de aumento de produtividade em toneladas de cana/hectare-ano, que gira em torno de 2,5% ao ano. A segunda rota, focada no setor industrial, buscará desenvolver tecnologias que permitam o aproveitamento integral da cana-de-açúcar na produção de etanol ou outros combustíveis renováveis ou mesmo, através do conceito de biorrefinaria, agregar valor à cadeia da cana, através da produção de novos produtos. Estas novas tecnologias concentram-se em duas linhas principais: a hidrólise do material lignocelulósico para produção de açúcares fermentescíveis (rota química e biológica) e a gaseificação deste material seguida pela síntese de combustíveis líquidos (rota térmica). Neste novo paradigma para a cana-de-açúcar, coletar-se-ia a cana integral (otimização do processo de colheita), além de se otimizar o balanço energético da usina de forma a aumentar a quantidade de biomassa excedente. A hidrólise e/ou a gaseificação da palha e do bagaço residual da cana, uma vez desenvolvidas, serão capazes de transformar fibras em etanol, a partir da fermentação do açúcar gerado pela rota química de hidrólise ou da síntese de combustíveis líquidos (gasolina, óleo diesel, etanol, metanol, outros) pela rota térmica, aproveitando o gás gerado na gaseificação, conhecida como o processo BTL (biomass to liquid). Com este novo paradigma, pode-se projetar um aumento significativo da produção de etanol por hectare de cana plantada por ano,

passando dos atuais 6000 litros para cerca de 12000 litros (TRIELLI, POÇO, BONOMI, 2006).

3.2. O Biodiesel

O biodiesel é um produto originário da reação química entre o óleo de soja, ou qualquer outro óleo vegetal com o álcool etílico ou metílico. Durante o processo químico ocorre a reação conhecida por Transesterificação, onde os componentes do óleo (triglicerídeos) são convertidos a ácidos graxos e finalmente a ésteres dos respectivos ácidos gerados. Estes ésteres podem ser de base etílica, se for usado o etanol ou metílica, se empregar-se o metanol. É uma fonte de energética renovável, a exemplo de todos os produtos originários do ciclo produtivo da agro-industrial. Nesse ciclo, a energia, que está armazenado nos vegetais é transformado em combustível e, depois da combustão, parte destina-se a operação de um sistema como um motor, e parte retorna para a nova plantação na forma de CO_2 . O dióxido de carbono combinado com energia solar realimenta o ciclo. Existem varias vantagem em relação ao biodiesel. No aspecto ambiental, o biodiesel possibilita sensível diminuição dos níveis de poluição, em função de suas características de queima e, também pela presença do oxigênio na sua estrutura. Na mistura com o óleo diesel á uma redução dos princípios poluentes gerados pelos motores do ciclo diesel, denotando que o biodiesel é ideal para ônibus e caminhões. Portanto, existem ganhos ambientais importantes, como redução de óxido de hidrogênio e de CO_2 , gases de efeito estufa, material particulado e fuligem, altamente nocivos ao ser humano. A Fig.(3.1) ilustra o processo de obtenção de biodiesel.

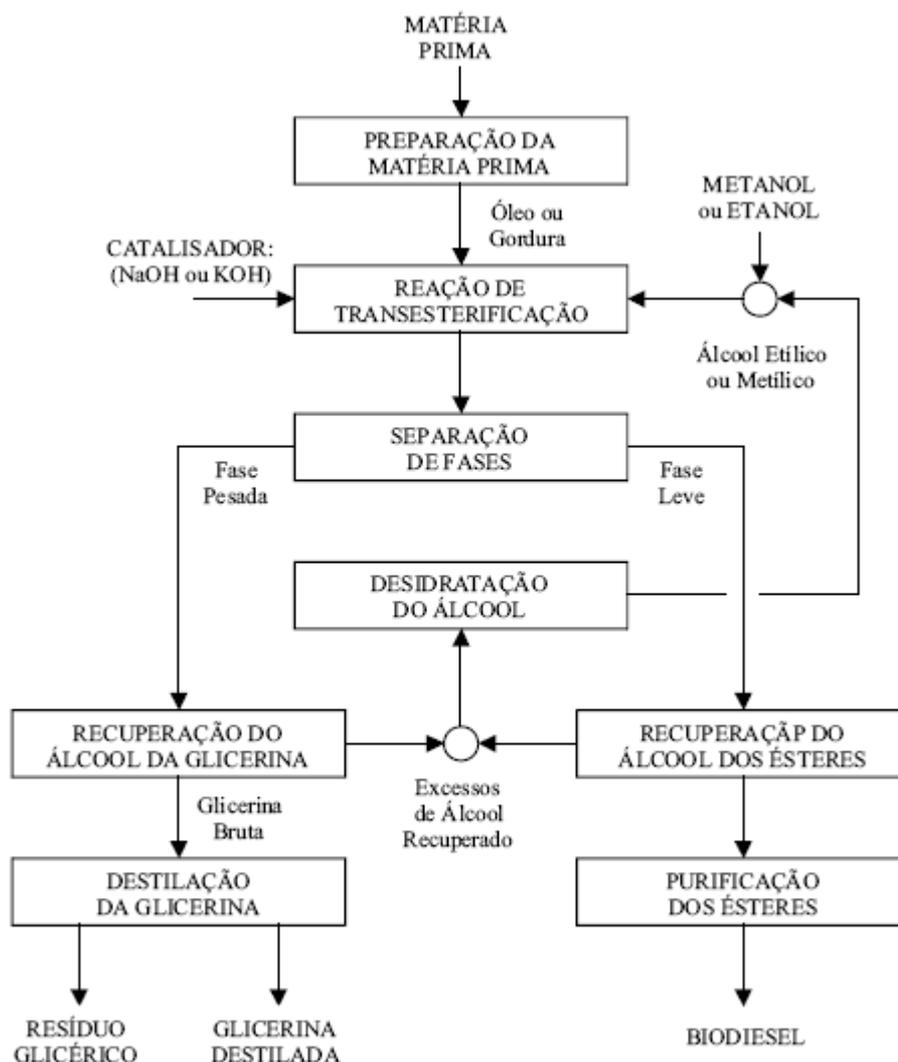


Figura 3. 1 – Fluxograma da produção de biodiesel.

3.2.1. Entraves na Produção de Biodiesel

Os processos atuais de produção de biodiesel estão concentrados fortemente na reação de transesterificação de óleos vegetais usando etanol anidro como reagente e catálise básica homogênea usando hidróxidos ou alcoóxidos de metais alcalinos. Geram os ésteres etílicos – o biodiesel – e como subproduto grandes quantidades de glicerina, substância que tem atualmente bom valor comercial no mercado internacional, mas que, com a produção em larga escala de biodiesel, pode se transformar num resíduo. Os catalisadores homogêneos empregados são de baixo custo e a temperatura usada devido a esses catalisadores se situa entre a ambiente e o

ponto de ebulição do álcool, tendo como vantagens a cinética mais simples e a maior atividade catalítica.

Por outro lado dentre as desvantagens pode-se citar a possibilidade da contaminação do produto final, a impossibilidade da reutilização do catalisador e a necessidade da matéria-prima estar isenta de umidade e de ácidos graxos livres. A umidade causa saponificação em condições alcalinas, e os ácidos graxos reagem com o catalisador alcalino produzindo sabões e água. A saponificação não só consome o catalisador, mas também causa a formação de emulsões as quais criam dificuldade na separação e purificação do biodiesel. Assim, para o biodiesel ser produzido comercialmente, os óleos necessitam ser desidratados e conter menos que 0,3 mg de KOH/g de ácidos graxos livres; o catalisador e o álcool necessitam ser anidros <0,1% de umidade. O óleo vegetal de maior produtividade agrícola – óleo de dendê – assim como outras matérias oleosas ou gordurosas de baixo custo (caso dos resíduos de óleo de fritura e do sebo animal) possuem elevada acidez. As formas de abaixar essa acidez vão desde a neutralização e lavagem, passando pela destilação dos ácidos graxos e chegando até o uso de esterificação prévia com uso de catalisadores ácidos, o que garante o máximo de uso da matéria oleosa ou gordurosa (Lepper & Friesenhagen, 1986). Além desses, outros fatores influenciam a velocidade e o rendimento da reação de transesterificação e são conhecidos desde os primeiros estudos sistemáticos são:

- tipo de álcool;
- temperatura da reação;
- tipo de catalisador empregado bem como sua concentração;
- tempo de agitação (em sistemas do tipo batelada);
- tempo total da reação ou tempo de residência.

Apesar do equilíbrio da reação ser desfavorável e do alto custo quando comparados com o metanol, segundo (SCHUCHARDT, 1998) no Brasil existe uma forte motivação para o emprego do etanol como o álcool na transesterificação, dada a sua grande disponibilidade. Existem diferenças consideráveis entre as reações conduzidas com metanol e etanol, principalmente nas etapas de separação. O etanol promove a intersolubilização das fases óleo e glicerol e é mais difícil de ser reciclado, caso umedecido. Se a temperatura de reação for muito elevada, ocorre a

formação desnecessária de sabões que necessitam ser removidos e promovem a formação de emulsões com grandes gastos de água e tempos de separação. Uma solução poderia ser a destruição dos sabões com ácidos, mas isso ocasionaria o aumento de ácidos graxos livres no produto final, deixando-o fora da especificação para esse item. Em grande parte, esses problemas poderão ser contornados com o desenvolvimento de catalisadores alternativos ou heterogêneos. A Fig.(3.2) ilustra as diferenças entre as reações de transesterificação via rota etílica e metílica.

Quantidades e Condições Usuais Médias Aproximadas	Rotas de Processo	
	Metílica	Etílica
- Quantidade Consumida de Álcool por 1.000 litros de biodiesel	90 kg	130 kg
- Preço Médio do Álcool, US\$ / kg	190	360
- Excesso Recomendado de Álcool, recuperável, por destilação, após reação	100%	650%
- Temperatura Recomendada de Reação	60°C	85°C
- Tempo de Reação	45 minutos	90 minutos

Figura 3. 2 – Fluxograma da produção de biodiesel.

Outro ponto importante na obtenção de biodiesel é o destino a ser dado à glicerina obtida no processo. Espera-se que a produção nacional tenha um acréscimo de 60 a 80 mil ton/ano com a adoção do B2 obrigatório. Algumas alternativas foram apresentadas, destacando-se o uso da glicerina e derivados como aditivos oxigenados para gasolina e aditivos para lamas de perfuração, dentre outros usos. Na literatura considera-se ainda o uso da glicerina na síntese de aditivos para o diesel, ou mesmo a simples queima para geração de vapor. Ainda há estudos correntes para o aproveitamento da glicerina como matéria prima de biogás. Finalmente, de acordo com pesquisas feitas no Departamento de Engenharia Química da Universidade de Pernambuco, um consórcio bacteriano extraído do esterco bovino é capaz de fazer a síntese do biogás a partir da glicerina (TRIELLI, POÇO, BONOMI, 2006).

4. REVISÃO TERMODINÂMICA

Dada a definição do problema, serão apresentadas a seguir as ferramentas que permitem a estruturação do problema do ponto de vista da termodinâmica.

4.1. A Primeira Lei da Termodinâmica

Segundo (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003), primeira lei da termodinâmica estabelece que, durante qualquer ciclo percorrido por um sistema, a integral cíclica do calor é proporcional a integral cíclica do trabalho de acordo com a eq.(4.1).

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (4.1)$$

A eq.(4.1) estabelece a primeira lei da termodinâmica para um sistema que efetua um ciclo. Muitas vezes, no entanto, é mais interessante estudar um processo do que um ciclo, e assim, ir-se-á considerar a primeira lei da termodinâmica para um sistema que passa por uma mudança de estado. Isso pode ser feito pela introdução de uma nova propriedade, a energia, cujo símbolo será a letra E . Considerando um sistema que percorre um ciclo, mudando do estado 1 para o estado 2 pelo processo A e voltando do estado 2 para o estado 1 pelo processo B. Utilizando a eq.(4.1) tem-se

$$\int_1^2 \delta Q_A + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_A + \int_2^1 \delta W_B \quad (4.2)$$

Agora considerando um outro ciclo, com o sistema mudando do estado 1 ao estado 2 pelo processo C e voltando ao estado 1 pelo processo B, pode-se escrever

$$\int_1^2 \delta Q_C + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_C + \int_2^1 \delta W_B \quad (4.3)$$

Substituindo a eq.(4.3) na eq.(4.2) e reordenando tem-se:

$$\int_1^2 (\delta Q - \delta W)_A = \int_1^2 (\delta Q - \delta W)_C \quad (4.4)$$

Visto que A e C representam processos arbitrários entre os estados 1 e 2, conclui-se que a quantidade $(\delta Q - \delta W)$ é a mesma para todos os processos entre o estado 1 e 2. Assim, $(\delta Q - \delta W)$ depende somente dos estados inicial e final e não depende do caminho percorrido entre os dois estados. Conclui-se então que $(\delta Q - \delta W)$ é uma diferencial de uma função de ponto e, portanto, é a diferencial de uma propriedade do sistema. Essa propriedade é a energia do sistema representada pela letra E , tem-se

$$\begin{aligned} \delta Q - \delta W &= dE \\ \delta Q &= dE + \delta W \end{aligned} \quad (4.5)$$

Observa-se que, sendo E uma propriedade, sua diferencial dE . Assim, integrando a eq. (4.5) tem-se

$$Q_{1-2} = E_2 - E_1 + W_{1-2} \quad (4.6)$$

Onde Q_{1-2} é o calor transferido para o sistema durante o processo do estado 1 ao estado 2, E_1 e E_2 são os valores inicial e final da energia do sistema e W_{1-2} é o trabalho realizado pelo sistema durante o processo. Um sistema também pode ser composto por vários subsistemas e, nestes casos, é possível aplicar separadamente a primeira lei da termodinâmica.

O significado físico da propriedade E é representar toda a energia de um sistema em um dado estado. Essa energia pode estar presente em uma multiplicidade de formas, tais como a energia cinética ou a energia potencial do sistema em relação a um sistema de coordenadas; energia associada com o movimento e posição das partículas; energia associada com a estrutura do átomo ou várias outras formas. Na termodinâmica é conveniente considerar-se separadamente as energias cinética e potencial e admitir que as outras formas de energia do sistema sejam representadas por uma única propriedade que será chamada de energia interna do sistema, representada pela letra U . Assim, pode-se escrever $E = \text{Energia Interna} + \text{Energia Cinética} + \text{Energia Potencial}$.

O motivo para essa separação é que as energias cinética e potencial estão associadas ao sistema de coordenadas que é escolhida e podem ser determinadas pelos parâmetros macroscópicos de massa, velocidade e elevação. A energia interna U inclui todas as outras formas de energia do sistema e está associado ao estado termodinâmico do sistema. Como cada uma das parcelas é uma função de ponto, é possível escrever

$$dE = dU + d(EC) + d(EP) \quad (4.7)$$

Finalmente, a primeira lei da termodinâmica para uma mudança de estado do sistema pode ser enunciada da seguinte forma

$$\delta Q = dU + d(EC) + d(EP) + \delta W \quad (4.8)$$

Pode-se deduzir a expressão para a energia cinética considerando inicialmente um sistema que esteja em repouso em relação a um referencial fixo à superfície da Terra. Aplicando-se uma força F horizontal sobre o sistema, admitindo que o movimento apresente um deslocamento dx na direção da força e que não haja transferência de calor nem variação da energia interna. Como não há variação da energia potencial, a primeira lei representada pela eq.(4.8) pode ser simplificada para $\delta W = -Fdx = -d(EC)$, mas

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{dx}{dt} \frac{dv}{dx} = mv \frac{dv}{dx} \quad (4.9)$$

Assim,

$$d(EC) = Fdx = mvdv \quad (4.10)$$

Integrando, obtém-se a expressão para a energia cinética evidenciada pela eq.(4.11).

$$EC = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.11)$$

Uma expressão para a energia potencial pode ser obtida da mesma forma. Considera-se um sistema inicialmente em repouso e a certa cota em relação a um plano de referencia. Deixemos atuar sobre o sistema uma força vertical F, de intensidade tal que eleva (em altura) o sistema, a velocidade constante, de uma quantidade dZ. Admitamos que a aceleração, devida a gravidade, nesse ponto seja g e que não haja transferência de calor nem variação da energia interna do sistema. A primeira lei neste caso fica $\delta W = -FdZ = -d(EP)$, mas

$$F = ma = mg \quad (4.12)$$

Assim,

$$d(EC) = FdZ = mgdZ \quad (4.13)$$

Integrando, e admitindo-se que g não varie com Z, obtém-se a expressão para a energia potencial evidenciada pela eq.(4.14).

$$(EP)_2 - (EP)_1 = mg(Z_2 - Z_1) \quad (4.14)$$

Combinando as eq.(4.11) e eq.(4.14) para as energias cinética e potencial com a eq. (4.8) e integrando do estado 1 para o estado 2 com g constante é possível escrever a primeira lei da termodinâmica de acordo com a eq.(4.15).

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + W_{1-2} \quad (4.15)$$

4.1.1. Entalpia

Na análise de processos específicos, freqüentemente encontra-se certas combinações de propriedades termodinâmicas que são, portanto, também propriedades da substancia que sofre a mudança de estado. Para mostrar uma situação em que isso ocorre, considera-se um sistema que passa por um processo quase estático a pressão constante. Admite-se que também não haja variações de energias cinética ou potencial e que o único trabalho realizado durante o processo seja aquele associado ao movimento de fronteira. Considerando o gás como fronteira e aplicando a primeira lei tem-se

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + W_{1-2} \quad (4.16)$$

O trabalho pode ser calculado pela eq.(4.17)

$$W_{1-2} = \int_1^2 p dV \quad (4.17)$$

Como a pressão é constante,

$$W_{1-2} = \int_1^2 p dV = p(V_2 - V_1) \quad (4.18)$$

Portanto

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + p_2V_2 - p_1V_1 = (U_2 - p_2V_2) - (U_1 + p_1V_1) \quad (4.19)$$

Verifica-se que para este caso muito restrito, a transferência de calor durante o processo é igual á variação da quantidade $(U + pV)$ entre os estados inicial e final. Como todos os elementos dessa expressão são propriedades termodinâmicas, funções apenas do estado do sistema, a combinação dos mesmos deve apresentar, obrigatoriamente, as mesmas características. Torna-se, portanto, definir a propriedade termodinâmica extensiva chamada entalpia expressa pela eq.(4.20).

$$H = U + pV \quad (4.20)$$

Ou na base mássica, isto é, dividindo pela unidade mássica, tem-se a entalpia específica representada pela eq.(4.21)

$$h = u + pV \quad (4.21)$$

4.1.2. Conservação da Massa e o Volume de Controle

O volume de controle é um volume no espaço que interessa para o estudo ou análise de um processo. A superfície que envolve esse volume é chamada de superfície de controle e é sempre uma superfície fechada. O tamanho e a forma do volume de controle são arbitrários e podem ser definidos de forma que a análise a ser feita seja a mais fácil possível. A superfície pode ser fixa ou móvel, entretanto o movimento desta deve ser referenciado em relação a algum sistema de coordenadas (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003).

Massa e calor podem atravessar a superfície de controle, e a massa contida no volume de controle, bem como suas propriedades, podem variar ao longo do tempo. Considera-se inicialmente a lei de conservação de massa relacionada com o volume de controle. É impossível construir ou destruir matéria, e para adequar essa análise à volumes de controle é necessário trabalhar-se com fluxos de massa que entram e saem do volume de controle e também do aumento líquido de massa que ocorre em

seu interior. A taxa de variação da massa no volume de controle pode ser diferente se zero se a vazão em massa que entra no volume de controle for maior que a vazão em massa que sai do volume de controle, assim, a taxa de variação = vazão em massa que entra – vazão em massa que sai. Se existem vários escoamentos entrando e saindo do volume de controle, este conceito pode ser representado matematicamente por

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (4.22)$$

A eq.(4.22) estabelece que a taxa de variação da massa no volume de controle é igual à somatória de todos os fluxos de massa que entram no volume de controle, através da superfície de controle, menos a somatória de todos os fluxos de massa que saem do volume de controle. A eq. (4.22) é chamada de equação da continuidade.

Admitindo que haja um escoamento através de um duto de seção transversal circular de área A , com uma velocidade média v , a vazão em volume é dada pela expressão

$$\dot{v} = vA = \int v_{local} dA \quad (4.23)$$

De modo que a vazão em massa se torna igual a

$$\dot{m} = \rho_{médio} \dot{v} = \frac{\dot{v}}{v_{médio}} = v \frac{A}{v_{médio}} = \int \left(\frac{v_{local}}{v} \right) dA \quad (4.24)$$

A eq.(4.24) é válida para qualquer uma das várias correntes que entram ou saem do volume de controle.

4.1.3. A Primeira Lei para Volumes de Controle

Calor, trabalho e fluxos de massa atravessam a superfície de controle do volume de controle. Energia não pode ser criada ou destruída. Desse modo, a

variação da energia do volume de controle só pode ser provocada pelas taxas de transferência de energia detectadas na fronteira do volume de controle.

O fluido que atravessa a superfície de controle transporta energia por unidade de massa igual a eq.(4.25).

$$e = u + \frac{1}{2}v^2 + gZ \quad (4.25)$$

Esta energia é referenciada a um certo estado da substancia e a uma posição. Toda a vez que o fluido entra no volume de controle, num estado e , ou sai do mesmo no estado s , existe um trabalho de movimento de fronteira associado a estes processos. O volume de controle realiza trabalho para descarregar os escoamentos e o ambiente realiza trabalho para que exista o escoamento para dentro do volume de controle. O trabalho associado ao escoamento na fronteira do volume de controle, por unidade de massa é PV . Pode-se adicionar este termo a energia por unidade de massa associada ao escoamento na fronteira do volume de controle, e assim, definirmos a energia total por unidade de massa associada ao escoamento. Deste modo, fica evidente a utilidade da definição da propriedade entalpia, uma vez que a combinação $(u + pV)$ sempre está presente quando existe um fluxo de massa através de uma superfície de controle.

$$e + pv = u + pv + \frac{1}{2}v^2 + gZ = h + \frac{1}{2}v^2 + gZ \quad (4.26)$$

Em termos de fluxo, a primeira lei da termodinâmica pode ser escrita da seguinte forma evidenciada pela eq.(4.27)

$$\frac{dE_{\text{sistema}}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (4.27)$$

Rearranjando a equação, tem-se

$$\frac{dE_{sistema}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \dot{m}_e e_e - \dot{m}_s e_s + \dot{W}_{escoamento} \quad (4.28)$$

Combinando a eq.(4.28) com a eq.(4.27) tem-se

$$\frac{dE_{sistema}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e) - \dot{m}_s (h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + gZ_s) \quad (4.29)$$

Esta forma da primeira lei da termodinâmica mostra que a taxa de variação de energia no volume de controle é devida à taxa líquida de transferência de calor, à taxa líquida de realização de trabalho e aos fluxos de energia total na fronteira do volume de controle.

Definindo-se um volume de controle que apresente várias seções de alimentação e de descarga, torna-se necessário realizar a somatória dos termos associados aos escoamentos e a forma final da primeira lei para volumes de controle fica

$$\frac{dE_{sistema}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e) - \sum \dot{m}_s (h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + gZ_s) \quad (4.30)$$

4.1.4. A Primeira Lei para Regime Permanente

Para equacionar a primeira lei da termodinâmica para regime permanente deve-se considerar as seguinte hipóteses (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003)

- O volume de controle não se move em relação ao sistema de coordenadas.
- O estado da substância, em cada ponto do volume de controle, não varia com o tempo.
- O fluxo de massa e o estado desta massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não variam com o tempo. As

taxas nas quais calor e trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes.

De posse dessas premissas pode-se escrever

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = 0 \text{ e } \frac{dm_{v.c.}}{dt} = 0 \quad (4.31)$$

Assim, a primeira lei da termodinâmica para regime permanente fica

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e) = \sum \dot{m}_s (h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + gZ_s) + \dot{W}_{v.c.} \quad (4.32)$$

4.2. A segunda Lei da Termodinâmica

A seguir será definida a propriedade entropia no contexto da segunda lei da termodinâmica e a seguir será apresentada a sua formulação para volumes de controle.

4.2.1. A desigualdade de Clausius

A desigualdade de Clausius é uma formulação moderna da segunda lei da termodinâmica e é assim expressa de acordo com a eq.(4.33).

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (4.33)$$

De acordo com a desigualdade de Clausius, para todos os ciclos reversíveis de motores térmicos a integral cíclica de $(\delta Q/T)$ é nula. Entende-se por processo reversível todo aquele processo que tendo ocorrido, pode ser invertido sem deixar vestígios no sistema e no meio. Ainda de acordo com a desigualdade de Clausius, para motores térmicos operando de forma irreversível a integral cíclica de $(\delta Q/T)$ é menor que zero (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003).

4.2.2. Entropia

Dado um sistema que percorra um processo reversível do estado 1 ao estado 2, representado pelo caminho A, e que o ciclo seja completado através de um processo reversível, representado pelo caminho B. Como esse ciclo é reversível pode-se escrever

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B \quad (4.34)$$

Considerando, agora outro ciclo reversível que tem o processo inicial alterado para o caminho representado pelo caminho C e completado através do mesmo processo reversível representado pelo caminho B. Para esse ciclo,

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B \quad (4.35)$$

Substituindo a eq.(4.35) na eq.(4.34) tem-se

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C \quad (4.36)$$

Como é uma constante para todos os caminhos reversíveis entre os estados 1 e 2, concluímos que essa quantidade é independente do caminho e é apenas função dos estados inicial e final; portanto ela é uma propriedade. Esta propriedade é denominada entropia e é designada por S (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003). Assim,

$$dS \equiv \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{reversível}} \quad (4.37)$$

A entropia é uma propriedade extensiva, e a entropia por unidade de massa é designada pela letra s . É importante notar que a entropia é definida em função de um processo reversível. A variação de entropia de um sistema em uma mudança de estado é obtida pela integração da eq.(4.37). Assim,

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{reversível}} \quad (4.38)$$

Para um processo irreversível, a taxa de variação da entropia é maior do que essa referente a um processo irreversível que apresente o mesmo δQ e T , assim,

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + \delta S_{\text{gerado}} \quad (4.38)$$

O termo δS_{gerado} representa a geração de entropia no processo devido à ocorrência de irreversibilidades no sistema. A geração interna de entropia pode ser causada por mecanismos como atrito, expansão não resistida e redistribuição interna de energia com diferenças finitas de temperatura.

4.2.3. A Segunda Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle

O passo inicial para o desenvolvimento da segunda lei da termodinâmica para volumes de controle é a equação da taxa de variação da entropia para sistemas, mostrada através da eq.(4.39).

$$\frac{dS_{\text{sistema}}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{\text{gerado}} \quad (4.39)$$

Agora é necessário considerar as contribuições dos fluxos de massa que atravessam a fronteira do volume de controle. A taxa de geração de entropia geralmente nos escoamentos normalmente não é nula, mas ela ocorre dentro do volume de controle ou fora dele. Levando em consideração esse fato, pode-se

estabelecer a equação do balanço de entropia num volume de controle. Este balanço estabelece que a taxa de variação total de entropia para o volume de controle, que ocorre através da superfície de controle com a taxa de criação de entropia devida a transferência de calor ao volume de controle e com a taxa de geração de entropia no volume de controle. Assim,

$$\frac{dS_{sistema}}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} + \dot{S}_{gerada} \quad (4.40)$$

4.2.4. O Processo em Regime Permanente

Para o processo em regime permanente, conclui-se que a entropia específica, em qualquer ponto do volume de controle, não varia com o tempo. Assim, o primeiro termo da eq.(4.40) é nulo.

$$\frac{dS_{sistema}}{dt} = 0 \quad (4.41)$$

Deste modo, para o regime permanente, tem-se,

$$\sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e = \sum \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} + \dot{S}_{gerada} \quad (4.42)$$

Onde os vários fluxos de massa, a taxa de transferência de calor, a taxa de geração de entropia e os estados são todos constantes ao longo do tempo.

5. CICLO DE POTÊNCIA

Abordados as ferramentas da termodinâmica clássica que permitirão a abordagem do problema, faz-se necessário agora introduzir o conceito de ciclo de potência, que servirá de base para se modelar a usina de produção de álcool e biodiesel.

Algumas centrais de potência, como uma central simples de vapor d'água operam segundo um ciclo. Isto é, o ciclo de trabalho, no caso o vapor d'água, sofre uma série de processos e finalmente volta ao seu estado inicial. Em outras centrais de potencia, como motores a combustão interna e turbinas a gás, o fluido de trabalho, no fim do processo, apresenta uma composição química diferente ou está num estado termodinâmico diferente do inicial. Neste trabalho serão analisados somente os ciclos de potencia que operam através de ciclo fechado, mais especificamente o ciclo de Rankine (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003).

5.1. Equipamentos Térmicos

Antes de iniciar a discussão a respeito do ciclo de potencia, é necessário analisar os componentes principais que os compõe.

5.1.1. Gerador de Vapor

Geradores de vapor (caldeira) são trocadores de calor onde o fluido de trabalho entra pela seção de entrada no estado líquido e recebe calor proveniente da queima de combustível¹. A troca de calor acontece a pressão constante e na seção de saída há água no estado de vapor saturado. As variações de energia cinética nas seções de entrada e de saída do gerador de vapor são pequenas em relação à variação da energia interna sofrida pelo fluido de trabalho e podem ser desconsideradas na avaliação do equipamento (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003).

¹ O estado do combustível pode ser sólido, líquido ou gasoso.

5.1.2. Condensador

Um condensador é um equipamento em que ocorre a troca de calor de um fluido para outro. Normalmente o trocador de calor opera em regime permanente e a transferência de calor ocorre num único tubo ou num conjunto de inúmeros tubos. O fluido a ser analisado pode ser o que está sendo aquecido ou o que está sendo resfriado. O condensador é alimentado com vapor superaquecido e líquido é descarregado do condensador. O processo tende a ocorrer a pressão constante porque a perda de carga no escoamento do refrigerante não é significativa. Não existe meio para se realizar trabalho de eixo num condensador e as variações das energias cinética e potencial são pequenas e podem ser desconsideradas na análise (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003).

5.1.3. Turbina

A turbina é um equipamento rotativo que normalmente opera em regime permanente dedicado à produção de trabalho de eixo (ou potência). O trabalho realizado na turbina é produzido a partir da queda de pressão do fluido de trabalho. Estes equipamentos podem ser agrupados em duas classes gerais: a formada pelas turbinas a vapor (ou outro fluido de trabalho), aonde o vapor que deixa a turbina alimenta um condensador, onde o vapor é condensado até o estado líquido, e as turbinas a gás, aonde o fluido é normalmente descarregado na atmosfera. A pressão de descarga de toda as turbinas é fixada pelo ambiente onde é descarregado o fluido de trabalho e a pressão na seção de alimentação da turbina é gerada através de um bombeamento ou compressão do fluido de trabalho. É possível identificar dois processos distintos no escoamento de fluido de trabalho na turbina. No primeiro processo, o fluido de trabalho escoar por um conjunto de bocais ou passagens formadas por pás fixas onde o fluido é expandido até uma pressão menor e assim produzindo um escoamento de alta velocidade. No segundo processo, este escoamento de alta velocidade é dirigido por um conjunto de pás móveis aonde a velocidade é reduzida antes do escoamento ser descarregado da passagem. Esse decréscimo de velocidade provoca um torque no eixo da máquina e, então, obtém-se

trabalho de eixo. Normalmente a turbina descarrega um escoamento que produz pressão e velocidades baixas (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003).

5.1.4. Bombas

Bombas são equipamentos utilizados para aumentar a pressão no fluido² pela adição de trabalho de eixo³. A bomba mais comum é do tipo rotativo (tanto com escoamento axial ou radial/centrífugo) onde os processos internos são essencialmente opostos aos que ocorrem numa turbina. O fluido de trabalho entra no compressor a baixa pressão e é obrigado a escoar num conjunto de pás móveis. Este então sai do conjunto de pás móveis a alta velocidade (é um resultado do trabalho de eixo sobre o fluido). O fluido então passa através de uma seção difusora aonde é desacelerado de modo que se obtém um aumento de pressão. Normalmente, as variações de energia potencial são desprezíveis bem como a energia cinética na seção de entrada do equipamento. A energia cinética na seção de descarga das bombas, na maioria dos casos, também pode ser desprezada bem como a transferência de calor para o fluido, sendo assim modelado como um processo adiabático (WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2003).

5.2. Introdução aos Ciclos de Potência

Considera-se o ciclo de potencia esquematizado na Fig. (5.1). Este ciclo é baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente e todos os equipamentos envolvidos apresentam uma única seção de alimentação e de descarga. Admite-se que todos os processos são internamente reversíveis e que estes não apresentam variações significativas de energia cinética e potencial. É aceitável que todos os processos de transferência de calor ocorram a pressão constante (sem realização de trabalho) e que a turbina e a bomba são adiabáticas. Assim, o trabalho líquido, por unidade de massa, realizado pelo ciclo é expresso pela eq. (5.1).

² Bombas operam com fluidos líquidos

³ Potencia se a análise for feita por unidade de tempo

$$w_{líq} = -\int_1^2 v dp + 0 - \int_3^4 v dp + 0 = -\int_1^2 v dp + \int_3^4 v dp \quad (5.1)$$

Como $p_2 = p_3$, $p_1 = p_4$, e considerando que os volumes específicos dos fluidos de trabalho no processo de expansão (estado 3 a 4) são maiores do que os referentes ao processo de compressão (estado 1 ao 2), conclui-se que o trabalho líquido realizado pelo ciclo é positivo. Esta conclusão também pode ser obtida analisando as áreas da Fig. (5.1). Assim, o trabalho líquido fornecido pelo ciclo é função da diferença entre os volumes específicos das fases.

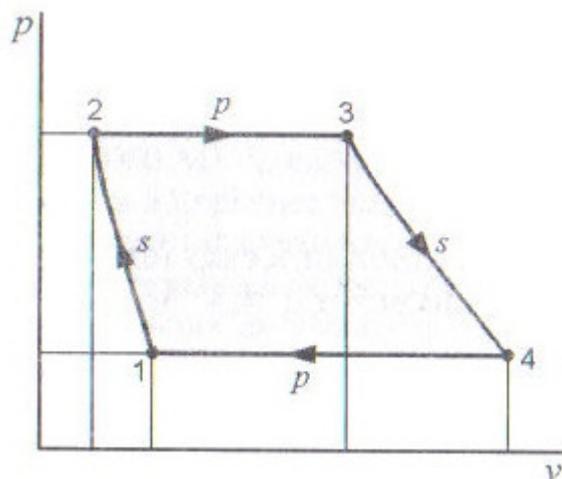


Figura 5. 1 – Ciclo de Potência baseado em quatro processos

5.3. O Ciclo de Rankine

Considerando um ciclo baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente representado pela Fig.(5.2). Admitindo que o estado 1 seja líquido saturado e que o estado 3 seja vapor saturado ou superaquecido. Este ciclo recebe a denominação de ciclo de Rankine. A Fig. (5.3) apresenta o diagrama T-s referente ao ciclo e os processos que compõe o ciclo são:

1-2: Processo de bombeamento adiabático⁴ reversível, na bomba.

⁴ Processo adiabático é aquele em que não ocorre troca de calor.

- 2-3: Transferência de calor a pressão constante, na caldeira.
- 3-4: Expansão adiabática reversível, na turbina.
- 4-1: Transferência de calor a pressão constante, no condensador.

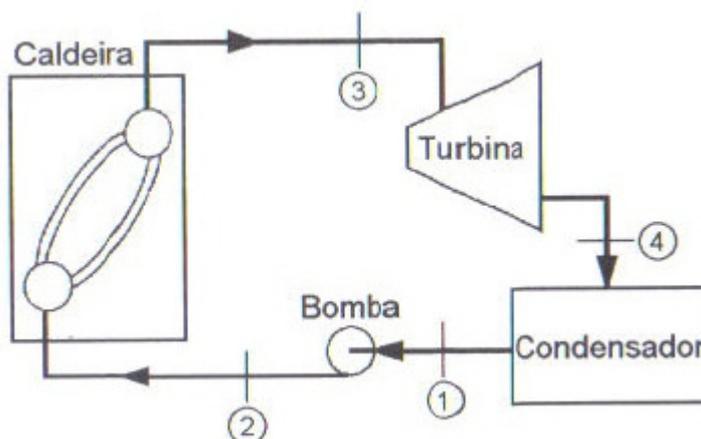


Figura 5.2 – Unidade produtora de vapor baseada em um ciclo de Rankine

O ciclo de Rankine pode apresentar reaquecimento do vapor, como no ciclo 1-2-3'-4'-1.

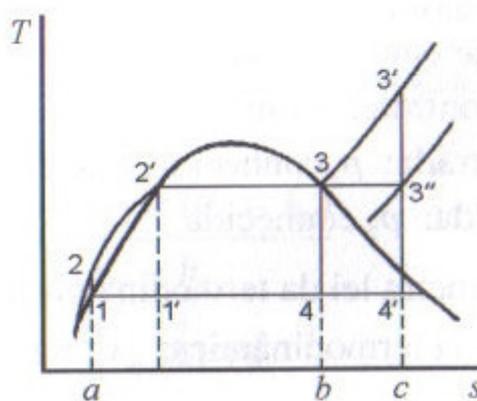


Figura 5.3 – Diagrama T-s do ciclo de Rankine

Se as variações de energia cinética e potencial forem desprezadas, as transferências de calor e o trabalho líquido podem ser representados pelas diversas áreas do diagrama T-s. O calor transferido ao fluido de trabalho é representado pela

área a-2-2'-3-b-a e o calor transferido do fluido de trabalho é representado pela área a-1-4-b-a. Utilizando a primeira lei da termodinâmica conclui-se que a área que representa o trabalho é igual a diferença entre essas duas áreas, isto é, a área 1-2-2'-3-4-1. O rendimento térmico é definido pela relação expressa pela eq.(5.2).

$$\eta_{térmico} = \frac{w_{líq}}{q_H} = \frac{\text{área } 1-2-2'-3-4-1}{\text{área } a-2-2'-3-b-a} \quad (5.2)$$

6. INTRODUÇÃO À TERMOECONOMIA

A termoeconomia propõe uma distribuição de custos baseada conceitos termodinâmicos da operação do sistema. Para tanto, faz uso da grandeza termodinâmica exergia, a qual pode ser vista como a capacidade de se produzir um efeito útil. Assim, a termoeconomia baseia-se na idéia de que a exergia é a única forma racional de atribuição de custos aos fluxos de um sistema energético.

6.1. Fundamentos da Análise Termoeconômica

De acordo com (PELLEGRINI, COSTA, OLIVEIRA JR., 2005), uma análise termoeconômica completa compreende as seguintes etapas:

- a) Análise exergética detalhada do sistema;
- b) Análise econômica detalhada dos equipamentos;
- c) Custeio exergético; e
- d) Avaliação exergoeconômica de cada equipamento do sistema

6.1.1. Análise Exergética

A Fig.(6.1), a seguir, representa um volume de controle genérico, no qual um fluxo de massa entra no volume de controle, recebe um fluxo de calor vindo de fora do mesmo, realiza um trabalho e sai do mesmo.

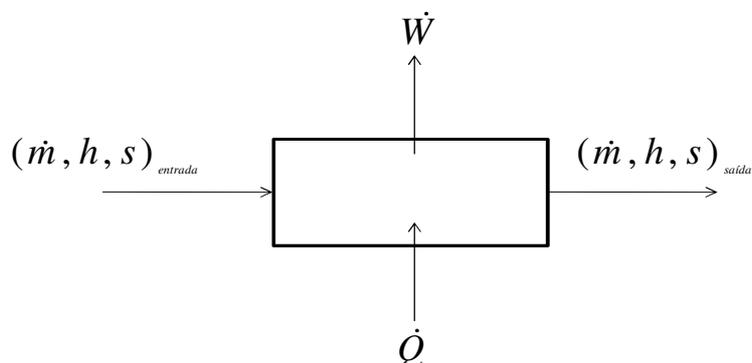


Figura 6. 1 – Balanço de exergia para um volume de controle

Pela Primeira Lei da Termodinâmica tem-se, desprezando-se as energias cinética e potencial:

$$(\dot{m} \cdot h)_{saída} - (\dot{m} \cdot h)_{entrada} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (6.1)$$

A Segunda Lei da Termodinâmica expressa que:

$$(\dot{m} \cdot s)_{saída} - (\dot{m} \cdot s)_{entrada} = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gerado} \quad (6.2)$$

O balanço de exergia é obtido através da combinação linear das duas equações anteriores, considerando o ambiente de referência T_0, p_0

$$(\dot{m} \cdot h)_{saída} - (\dot{m} \cdot h)_{entrada} - T_0 \cdot ((\dot{m} \cdot s)_{saída} - (\dot{m} \cdot s)_{entrada}) = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \dot{W} + T_0 \dot{S}_{gerado} \quad (6.3)$$

Sendo:

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (6.4)$$

Conclui-se:

$$(\dot{m} \cdot b)_{saída} - (\dot{m} \cdot b)_{entrada} = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \dot{W} + T_0 \dot{S}_{gerado} \quad (6.5)$$

$$\dot{B}_{saída} - \dot{B}_{entrada} = \dot{B}^Q - \dot{B}^W - \dot{B}_{destruído} \quad (6.6)$$

A eq.(6.3) representa o balanço de exergia válido para o volume de controle em questão. Esta expressão mostra a variação da exergia entre os fluxos de entrada e saída, sendo esta o máximo trabalho que poderia ser obtido nesta transformação. Esta

quantidade de trabalho é igual à somatória das seguintes parcelas – lado direito da equação:

- Trabalho realizado por um motor térmico operando entre T e T_0 , consumindo \dot{Q} e rejeitando calor ao meio a T_0 (exergia associada ao calor trocado);
- Trabalho útil realizado (exergia pura);
- Trabalho disponível destruído devido à presença de irreversibilidades no processo.

Assim, esta equação pode ser chamada de Lei de Degradação de Energia, uma vez que quantifica a redução da disponibilidade de realização de trabalho, devido à presença de irreversibilidades inerentes ao processo de conversão de energia.

6.1.2. Análise Econômica de Equipamentos

Segundo (PELLEGRINI, COSTA, OLIVEIRA JR., 2005) esta etapa se refere ao levantamento dos custos, de aquisição, operação e manutenção dos diversos equipamentos existentes no sistema, além de custos relacionados ao combustível. Assim, as principais variáveis desta etapa são:

- custos e tempo associados a aquisição;
- instalação,
- operação e manutenção de cada componente do sistema;
- taxa de inflação;
- taxa de escalonamento do investimento;
- fontes de financiamento e taxas de retorno de cada fonte;
- taxas de juros e;
- receitas de devido à venda de cada subproduto.

6.1.3. Custeio Exergético

Na termoeconomia um custo é atribuído a cada fluxo material/energético no sistema sendo estudado; este valor representa o custo total necessário para a obtenção deste fluxo. Considerando a Fig.(6.1), pode-se escrever o seguinte balanço de custos:

$$\dot{C}_{saída} + \dot{C}^W = \dot{C}^Q + \dot{C}_{entrada} + \dot{Z} \quad (6.7)$$

Rearranjando os termos desta equação, tem-se:

$$\dot{C}_{saída} - \dot{C}_{entrada} = \dot{C}^Q + \dot{C}^W + \dot{Z} \quad (6.8)$$

Comparando esta equação com a eq.(6.1), obtém-se o custo médio por unidade de exergia da seguinte forma:

$$c_{saída} \cdot \dot{B}_{saída} - c_{entrada} \cdot \dot{B}_{entrada} = c^Q \cdot \dot{B}^Q - c^W \cdot \dot{B}^W - \dot{Z} \quad (6.9)$$

$$c_{saída} \cdot (\dot{m} \cdot b)_{saída} - c_{entrada} \cdot (\dot{m} \cdot b)_{entrada} = c^Q \cdot \left(\dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right) - c^W \cdot \dot{W} - \dot{Z} \quad (6.10)$$

Ou seja, o custo médio por unidade de exergia de um fluxo material/energético qualquer c_i é definido por:

$$c_i = \frac{\dot{C}_i}{\dot{B}_i} \quad (6.11)$$

Os balanços representados pelas eq. (6.9) e eq.(6.10) podem ser aplicados para todos os componentes do sistema. Assim, no sistema de equações formado, as incógnitas são os custos médios por unidade de exergia de cada fluxo. Contudo, o número de equações é menor que o número de incógnitas, caso o equipamento apresente mais de um fluxo de saída. Portanto é necessária a introdução de equações auxiliares para a determinação destes custos. Têm-se dois métodos:

- a) Método da Igualdade: todos os produtos têm o mesmo custo médio por unidade de exergia.

$$c_{saída} = c^W \quad (6.12)$$

- b) Método da extração: os custos dos equipamentos do volume de controle são descarregados em um único fluxo.

$$c_{saída} = c_{entrada} \quad (6.13)$$

- c) Método do subproduto: defini-se um custo para um dos produtos.

Com todos os custos calculados é possível determinar o custo da exergia destruída no volume de controle da seguinte forma:

$$\dot{C}_{destruída} = c_{entrada} \cdot \dot{B}_{destruída} \quad (6.14)$$

7. MODELOS PARA A PRODUÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Feitas as considerações a respeito dos princípios da termodinâmica, pode-se construir os modelos que regem a produção dos combustíveis.

7.1. Modelo para a Produção do Álcool

O modelo que contempla a produção de álcool será concentrado nas entradas e saídas do processo, isto é, serão analisados apenas alguns parâmetros relativos à produção do álcool. Tal abordagem se deve ao fato de não ser escopo deste trabalho analisar detalhadamente as variáveis que compõe a produção do combustível, mas sim determinar e quantificar as entradas e saídas necessárias para a produção do mesmo. A Fig.(7.1) trás um esquema simplificado de uma destilaria de álcool.

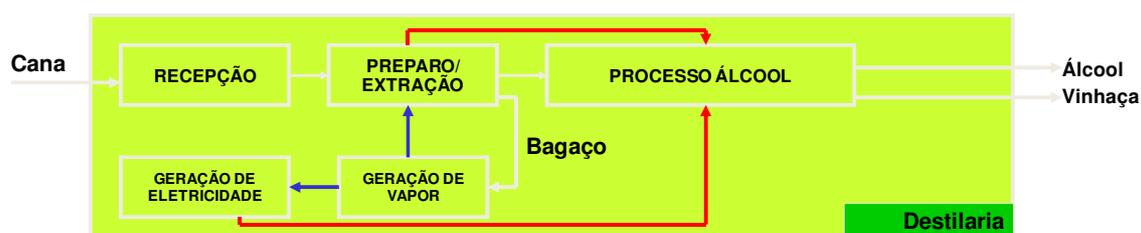


Figura 7.1 – Fluxograma da produção de álcool.

Desse modo identificam-se necessidades básicas para a produção do álcool combustível. A fim de padronizar o consumo dessas utilidades no processo, todas serão determinadas em função de cana de açúcar moída. Assim, é conveniente definir primeiramente a produção e moagem da cana de açúcar:

- Total de cana de açúcar moída por ano
- Dias de safra de cana por ano
- Tempo útil de moagem de cana de açúcar
- Razão de bagaço por unidade de cana de açúcar

A partir da análise dos dados referentes à cana de açúcar, é possível identificar:

- Rendimento global do processo, expresso em litros de álcool obtidos por tonelada de cana de açúcar moída.

- Razão de vapor consumido no processo de obtenção de álcool por tonelada de cana moída.
- Energia elétrica gasta no processo por cana de açúcar.

7.1.1. Parâmetros para a produção do álcool

Na tab.(7.1) estão evidenciados os valores que serão utilizados para a posteriormente na modelagem e equacionamento do modelo de usina integrada (OLIVÉRIO, 2007); (PELLEGRINI, 2007).

Tabela 7. 1 – Parâmetros relativos à produção de álcool.

Parâmetro	Valor
Moagem/ano safra (toneladas de cana)	3.000.000
Dias úteis/ano safra	238
Tempo útil de moagem de cana	85%
Relação bagaço/cana (t/tc)	0,266
Rendimento Industrial (litros álcool/tc)	88
Vapor do processo (t/tc)	0,55
Energia elétrica para o processo (kWh/tc) ⁵	30

⁵ Inclui a energia elétrica utilizada na moenda de cana

7.2. Modelo para a Produção de Biodiesel

A abordagem realizada para o modelo de produção de álcool também pode ser feita para a produção de biodiesel. Da mesma forma, é importante analisar as utilidades que são consumidas no processo de produção do combustível. A Fig.7.2 mostra o esquema da planta de biodiesel.

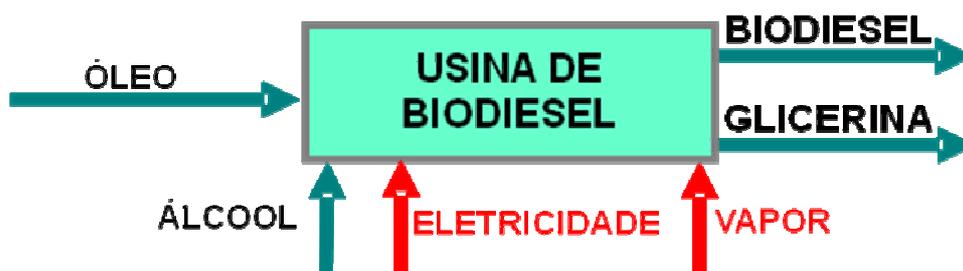


Figura 7. 2 – Fluxograma da produção de biodiesel.

Podem ser identificadas as necessidades básicas da planta de geração de biodiesel:

- Consumo de álcool por litro de biodiesel;
- Consumo de óleo vegetal por litro de biodiesel;
- Consumo de vapor por litro de biodiesel gerado;
- Consumo de energia elétrica por litro de biodiesel gerado.

7.2.1. Escolha do óleo vegetal a ser utilizado na produção do biodiesel.

Fatores como a geografia, o clima e a economia determinam o óleo vegetal de maior interesse para uso potencial nos biocombustíveis. Assim, nos Estados Unidos, por exemplo, o óleo de soja é considerado como matéria-prima primordial e, nos países tropicais, é o óleo de palma. Dentre as matérias-primas incluem-se os óleos de palma, soja, algodão e mamona, além dos óleos de menor produção como o de babaçu. Na Alemanha, o óleo de colza é utilizado na produção de biodiesel, o qual é distribuído de forma pura, isento de qualquer mistura ou aditivação. Há também a produção de biodiesel na Malásia a partir do óleo de palma. Os óleos vegetais mais comuns, cuja matéria prima é abundante no Brasil, são soja, milho, amendoim, algodão, babaçu e palma. A soja, considerada a rainha das leguminosas, dispõe de

uma oferta muito grande do óleo, pois quase 90% da produção de óleo no Brasil provêm dessa leguminosa. A produção brasileira de soja na safra de 2006/07 foi de aproximadamente 58 milhões de toneladas. Partindo do ponto e vista de oferta disponível, é mais interessante, portanto considerar o processo do biodiesel utilizando o óleo de soja (FERRARI, 2004).

7.2.2. Parâmetros necessários para a produção de biodiesel

Na tabela 7.2 estão evidenciados os valores que serão utilizados para a posteriormente na modelagem e equacionamento do modelo de usina integrada (FERRARI, 2004).

Tabela 7. 2 – Parâmetros relativos à produção de biodiesel.

Parâmetro	Valor
Consumo álcool (l/lbd)	0,165
Consumo óleo soja (kg/lbd)	1
Consumo vapor (kg/lbd)	4,15
Consumo energia (kWh/1000lbd)	65

8. PLANTA DE UTILIDADES

A partir dos parâmetros obtidos dos modelos de produção de álcool e biodiesel, é possível desenvolver um modelo de planta de utilidades para o sistema integrado. A planta de utilidades para a usina integrada pode ser esquematizada conforme a Fig.(8.1).

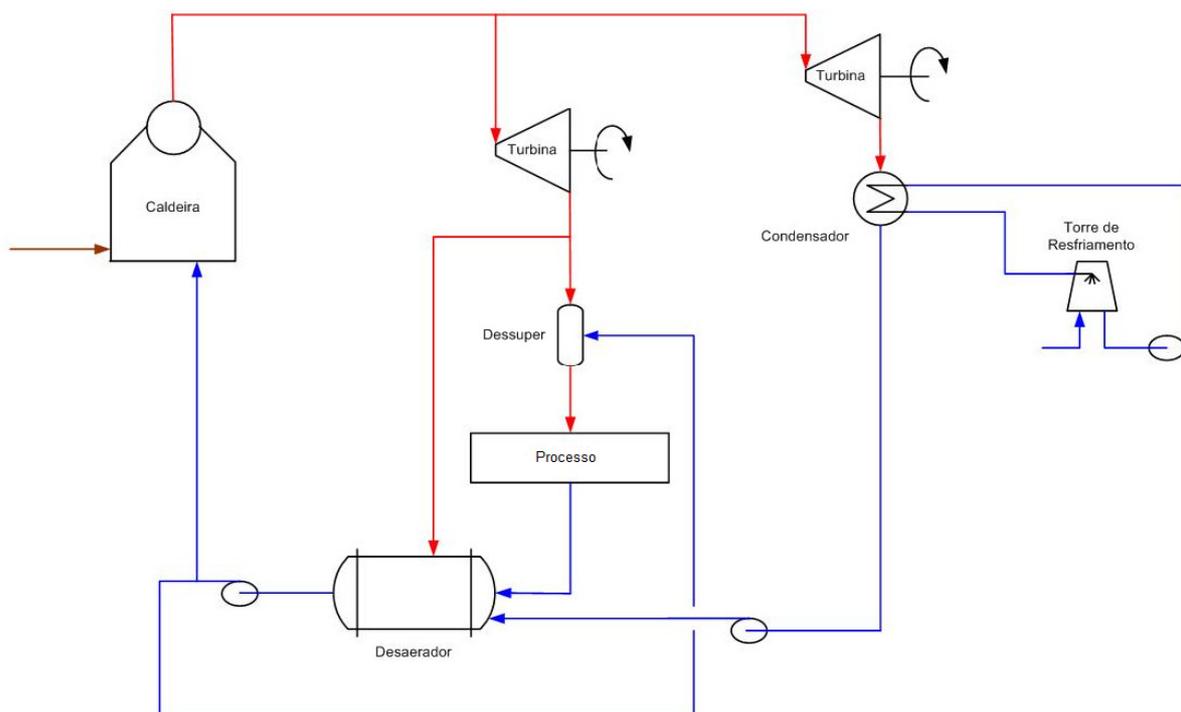


Figura 8. 1 – Planta de Utilidades

Bagaço de cana proveniente da moagem da cana de açúcar entra na caldeira e é utilizado como combustível para a produção de vapor que irá alimentar posteriormente o processo de produção de álcool e biodiesel e também irá, através de um ciclo de Rankine, gerar eletricidade para a posterior revenda.

8.1. Geração de Vapor

A geração de vapor é fundamental na produção de álcool e conseqüentemente na de biodiesel, pois o vapor é o veículo que conduz a energia térmica necessária para evaporar e separar o álcool nas colunas de destilação. Além disso, o vapor é

responsável por movimentar as turbinas a vapor, para a obtenção da energia mecânica nas moendas e geração de energia elétrica.

O sistema de geração e distribuição de vapor é constituído basicamente de caldeiras, separadores de fuligem, tratamento d'água para as caldeiras, bombeamento d'água para as caldeiras, esteiras transportadoras de bagaço e rede de distribuição de vapor.

As caldeiras nas usinas e destilarias que utilizam a cana-de-açúcar como matéria-prima, são preparadas para usar principalmente o bagaço de cana como combustível, mas podem eventualmente queimar lenha. São basicamente formadas de um queimador ou incinerador denominado de fornalha, e por um recuperador de calor formado por um feixe tubular aletado de formato especial que circunda a fornalha, denominado de parede d'água, e que interliga dois balões cilíndricos horizontais de aço carbono de grande espessura, onde a água é introduzida e de onde é distribuída para a tubulação. O bagaço, vindo das moendas e conduzido pelas esteiras transportadoras, é espargido na parte superior da fornalha que se encontra a uma temperatura de aproximadamente 1.200 °C, através de sistema pneumático de distribuição de bagaço. O comburente, o oxigênio, vem do ar que é introduzido na parte inferior da fornalha através de uma grelha basculante, por um ventilador de grande potência denominado de ventilador de ar forçado. A combustão ocorre em suspensão, pois o ar insuflado através da grelha cria um colchão pneumático que mantém o bagaço flutuando até sua queima total. O vapor produzido nas caldeiras é distribuído para os pontos de consumo por rede de tubulação termicamente isolada, com flexibilidade calculada e purgadores localizados estrategicamente com a função de coletar o condensado e retorná-lo ao sistema de tratamento d'água das caldeiras (LAMONICA, 2007).

8.2. Geração de Energia Elétrica

A energia elétrica é outra utilidade muito importante na produção de álcool. É responsável por mais de 90 % do bombeamento de líquidos, o acionamento de esteiras transportadoras, ventiladores, exaustores, agitadores, pontes rolantes e outros.

Os geradores de energia elétrica são equipamentos rotativos que têm a capacidade de transformar a energia mecânica da rotação em energia elétrica, podendo ser acionados por motores a explosão ou a diesel, turbinas hidráulicas ou a vapor, moinhos de vento, rodas d'água, etc. Na usina proposta, o sistema de geração de energia térmica e mecânica a partir de uma mesma fonte, o bagaço de cana, faz com que o rendimento se atinjam altos rendimentos energéticos. Isto se consegue produzindo nas caldeiras vapor de alta pressão ou vapor direto, que é então injetado e reduzido nas turbinas para a pressão de processo, gerando com esta variação o trabalho necessário para a produção da energia elétrica.

O vapor de baixa pressão que sai das turbinas é denominado agora de vapor de escape, e é utilizado principalmente no processo de evaporação do caldo. Atualmente, muitas usinas estão investindo nos programas de exportação de energia, que permitem que os excedentes de bagaço sejam convertidos em energia elétrica e então vendidos às concessionárias locais. Desta maneira, além de comercializar o biodiesel e o álcool as usinas tornaram-se também geradoras de energia elétrica provenientes de biomassa. A distribuição de energia elétrica, para os pontos de consumo, é normalmente feita em média tensão (13,8 KV), a partir da sala de controle da casa de força da usina (LAMONICA, 2007).

9. EQUACIONAMENTO MÁSSICO, ENERGÉTICO E EXERGÉTICO

A seguir é detalhado o equacionamento de cada parte que compõe a planta de utilidades. Primeiramente serão mostrados as equações para os balanços de massa e energia e posteriormente para o cálculo de exergias, irreversibilidades e custo exergético dos equipamentos. Para tornar mais claro os diversos pontos do sistema, as entradas e saídas dos equipamentos receberam números que auxiliam no equacionamento e serão mantidos para todas as análises. Estes pontos estão ilustrados na Fig.(9.1).

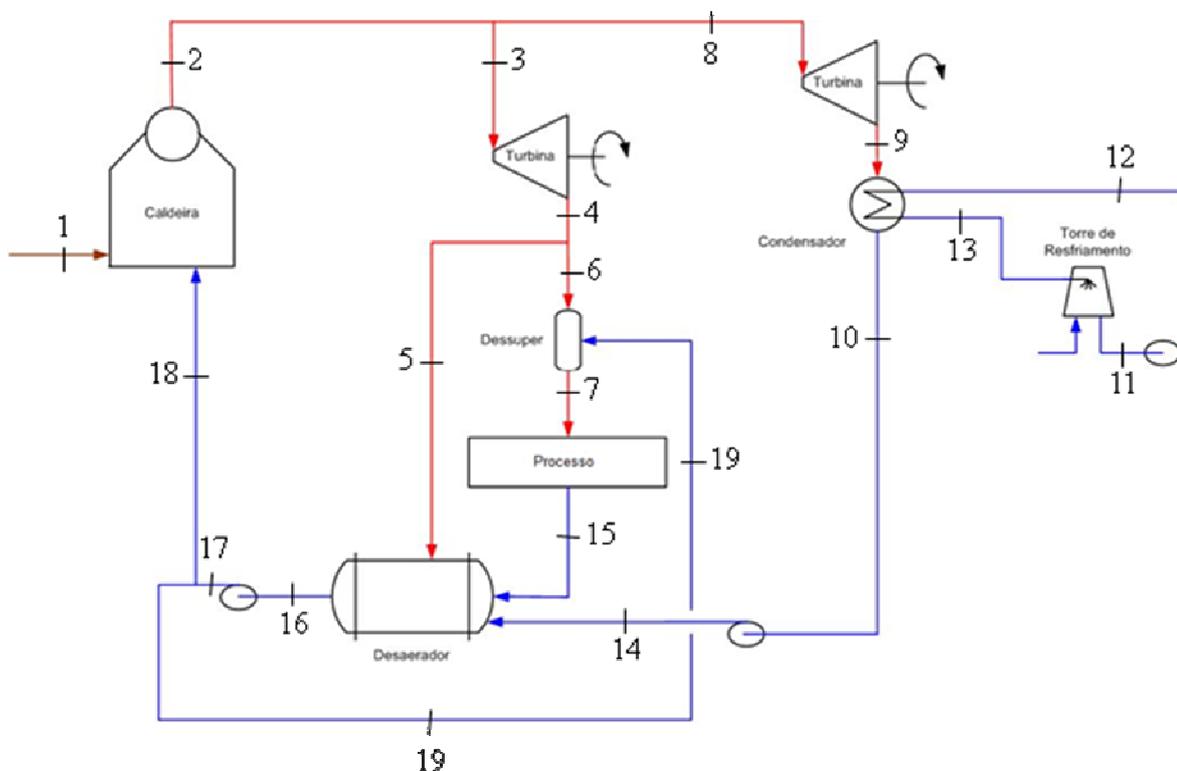


Figura 9. 1 – Pontos do Sistema

9.1. Hipóteses Adotadas

A seguir estão apontadas as premissas adotadas para a modelagem da planta de utilidades.

- A geração de energia elétrica excedente da queima de bagaço será dada através da modelagem de um ciclo de Rankine;

- A planta opera exclusivamente em regime permanente;
- Serão considerados os mesmos valores de temperatura do vapor para os processos de obtenção do álcool e do biodiesel;
- Os elementos da planta de utilidades terão um rendimento pré-definido;

9.2. Balanços de Massa e Energia

Segue o detalhamento do equacionamento dos balanços de massa e energia para a planta de utilidades do sistema.

9.2.1. Moenda

Na moenda será realizada a separação entre o bagaço que será o combustível na caldeira e o caldo de cana que alimentará o processo de produção do álcool.

$$\dot{m}_{bagaço} = \dot{m}_{cana} \text{dias}_{safra} \text{tempoútilmoagem} \quad (9.1)$$

$$\dot{m}_{bagaço} = \dot{m}_{cana} \text{razão}_{bagaço / cana} \quad (9.2)$$

$$\dot{m}_{bagaço \text{ disponível}} = (1 - \text{reservatécnica}) \cdot \dot{m}_{bagaço} \quad (9.3)$$

$$\dot{m}_{caldo} = \dot{m}_{cana} \quad (9.4)$$

9.2.2. Caldeira

O bagaço servirá de combustível na caldeira para a geração de vapor que irá alimentar o processo de fabricação dos combustíveis (álcool e biodiesel), conforme a Fig.(9.2).

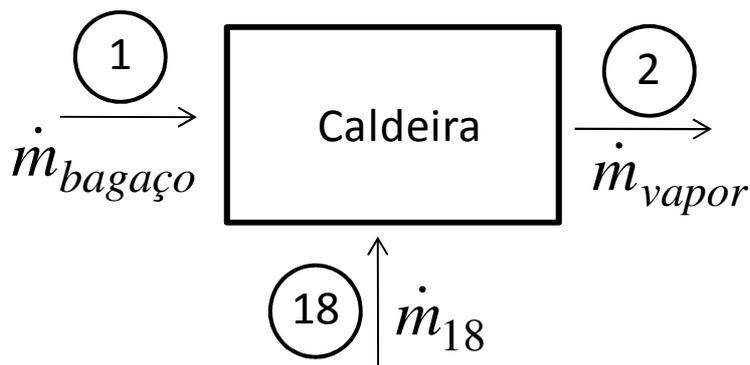


Figura 9.2 – Fluxos na Caldeira

Fixando: $\eta_{caldeira}, p_2, T_2$ pode-se determinar h_2 .

Aplicando a primeira lei da termodinâmica para o volume de controle que compreende a caldeira tem-se:

$$\dot{m}_{18}h_{18} + \dot{m}_{bagaço}C_p\eta_{cald} = \dot{m}_{vapor}h_2 \quad (9.5)$$

Assim consegue-se a relação de geração de vapor na caldeira:

$$\text{Produção Específica de Vapor} = \frac{\dot{m}_{vapor}}{\dot{m}_{bagaço}} \quad (9.6)$$

9.2.3. Turbina de Extração de Contra Pressão

O próximo passo é descobrir os estados do vapor na saída da turbina de contra – pressão e descobrir seu trabalho:

Turbina de Extração de Contra-Pressão

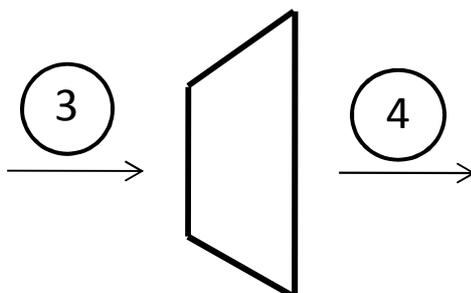


Figura 9.3 – Fluxos na Turbina de Contra Pressão

Conhece-se o estado 3 (já que é o mesmo da saída da caldeira)

Tem-se:

$$p_3 = p_{cald}$$

$$h_3 = h_2$$

Fixando o rendimento $\eta_{turbocontra}$ e a pressão de saída p_4 , podemos determinar o estado 4 (T_4, s_4, h_4, x_4) e o consumo específico da turbina:

$$\text{Consumo específico} = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_4(h_3 - h_4) \cdot 0,95} \quad (9.7)$$

Define-se trabalho da turbina:

$$W_{turbocontra} = \frac{\dot{m}_4}{\text{consumoespecífico}} = \dot{m}_4(h_3 - h_4)\eta_{turbocontra} \quad (9.8)$$

9.2.4. Desaerador/Dessuper/Processo

Da turbina de contra – pressão, parte do vapor vai para o desaerador segundo a Fig.(9.4).

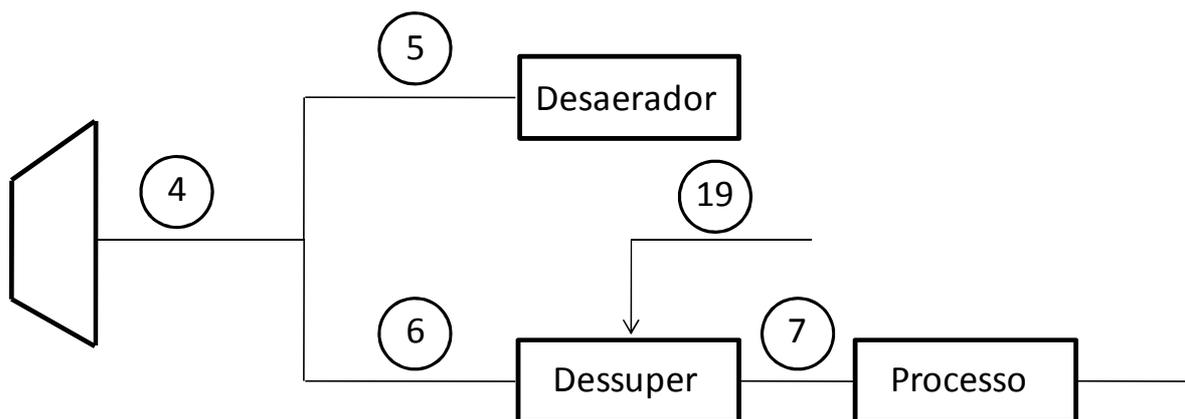


Figura 9. 4 – Fluxos na saída da Turbina de Contra Pressão

Assim, conhecido o estado 4, conhecemos os estados 5 e 6.

Analisando agora o Dessuper temos na saída (considerando um processo isobárico)

$$p_7 = p_6$$

$$T_7 = T_{processo}$$

Aplicando o balanço de massa e a primeira lei da termodinâmica:

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_{19} = \dot{m}_7 \quad (9.9 \text{ e } 9.10)$$

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{19} h_{19} = \dot{m}_7 h_7$$

9.2.5. Turbina de Condensação

Uma outra parcela do vapor que sai da turbina de de contra-pressão vai para a turbina de condensação que tem seu esquema mostrado na Fig.(9.5).

Turbina de Condensação

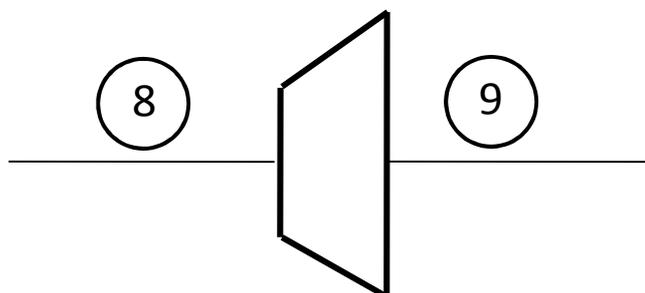


Figura 9. 5 – Esquema da Turbina de Condensação

Conhece-se o estado 8 (mesmo da saída da turbina de contra – pressão). Fixando a pressão de saída da turbina p_9 e um rendimento para a turbina de condensação, é possível identificar o estado 9 (T_9, s_9, h_9, x_9). Também é possível identificar o trabalho e o consumo específico da turbina.

Aplicando os balanços de massa e energia tem-se:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{vaporcond} \quad (9.11 \text{ e } 9.12)$$

$$\dot{m}_9 (h_8 - h_9) \cdot 0,95 \cdot \text{consumoespecifico} = \dot{m}_{vaporcond}$$

$$\text{consumo específico} = \frac{\dot{m}_9}{\dot{m}_9(h_8 - h_9) \cdot 0,95} \quad (9.13)$$

$$W_{\text{turbocond}} = \frac{\dot{m}_9}{\text{consumoespecífico}} = \dot{m}_9(h_8 - h_9)\eta_{\text{turbocond}} \quad (9.14)$$

9.2.6. Condensador

O micro-sistema que representa o ciclo do condensador está ilustrado na Fig.(9.6).

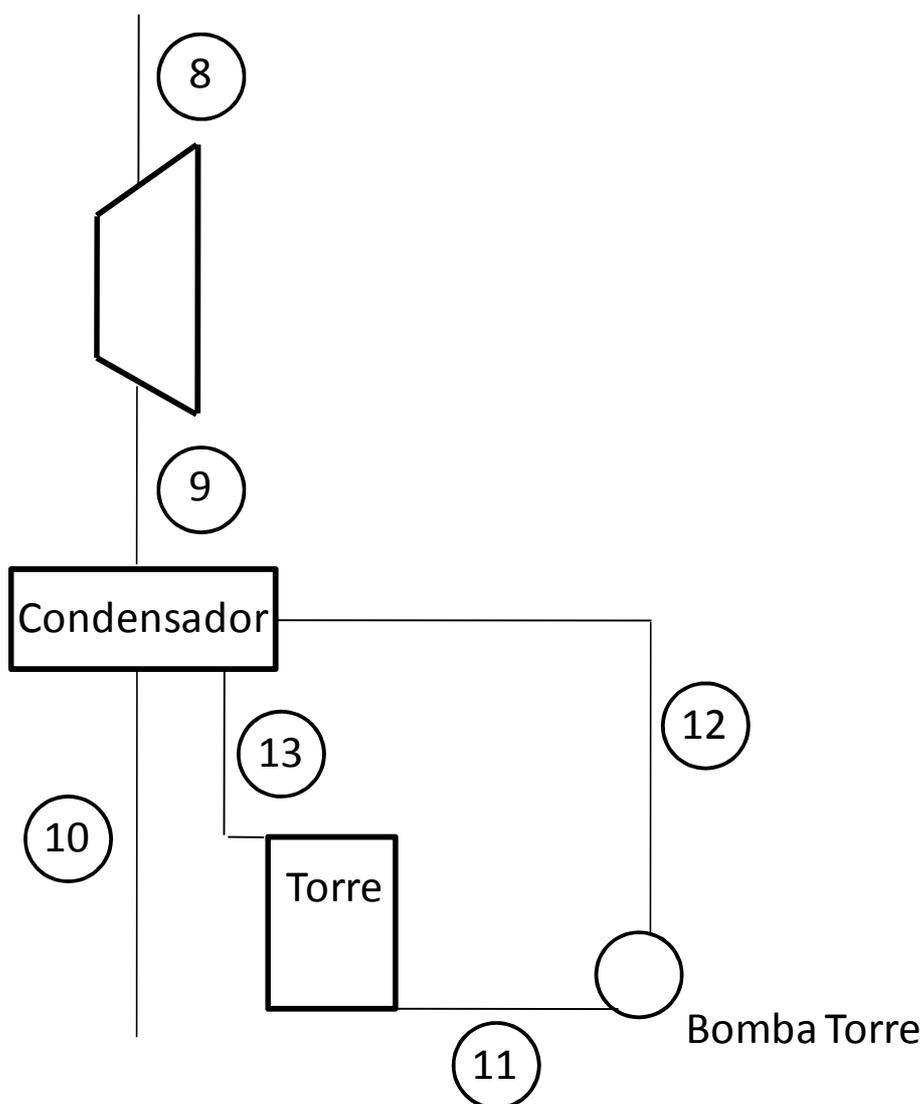


Figura 9. 6 – Micro – Sistema do Condensador

Para o vapor que passa através do condensador:

$$\begin{aligned} p_{10} &= p_9 \\ T_{10} &= T_{sat}(p_9) \\ h_{10} &= h(p_{10}, x = 0) \\ s_{10} &= s(p_{10}, x = 0) \end{aligned}$$

Analisando a água do condensador tem-se:

Sendo as condições ambiente $T_{amb} = 27^\circ C$, $p = 1 atm$

$$\text{Temos: } \begin{aligned} p_{11} &= 1 atm \\ T_{11} &= 27^\circ C \end{aligned}$$

Para a água que vai para o condensador definimos:

$$p_2, \eta_{bombatorre};$$

Aplicando a primeira lei da termodinamica para bombas, acha-se $h_{12}, s_{12}, T_{12}, x_{12}$.

Para a água que sai do condensador definimos também:

$$p_{13} = 1 atm, T_{13} \text{ encontra-se } h_{13}, s_{13}$$

Aplicando balanços de massa e energia temos:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{11} h_{11} + W_{bomba} &= \dot{m}_{12} h_{12} \\ \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{12} h_{12} &= \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{13} h_{13} \end{aligned} \quad (9.15 \text{ e } 9.16)$$

Agora, analisando a bomba do condensador, que está evidenciada na Fig.(9.7):

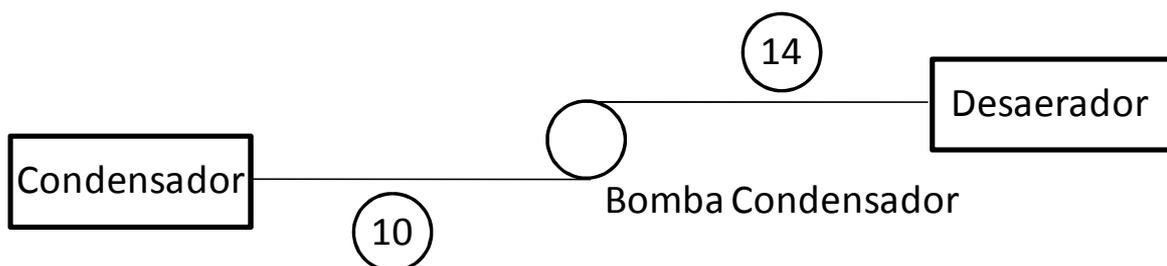


Figura 9.7 – Bomba do Condensador

$p_{14} = p_{16}$, com o rendimento da bomba e aplicando a primeira lei da termodinâmica para a bomba é possível descobrir $h_{14}, s_{14}, T_{14}, x_{14}$.

Fazendo os balanços de massa e energia temos:

$$\dot{m}_{10}h_{10} + W_{bombacond} = \dot{m}_{14}h_{14} \quad (9.17)$$

9.2.7. Processo

O vapor que chega ao processo pode ser esquematizado como a Fig.(9.8).

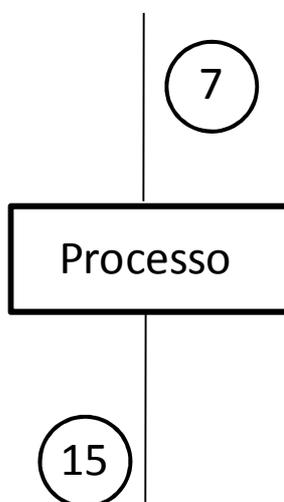


Figura 9.8 – Fluxos de vapor no processo

Considerando que o vapor não sofre queda de pressão ao longo do processo, temos: $p_{15} = p_7$ e T_{15} depende da temperatura que o processo exige, acha-se:

$$h_{15} = h(p_{15}, T_{15})$$

$$s_{15} = s(p_{15}, T_{15})$$

O vapor necessário para o processo se dá pela equação:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{processo} &= \dot{m}_{vapores} p_{processo} m_{cana} \\ \dot{m}_7 &= \dot{m}_{processo} \dot{m}_{15} \end{aligned} \quad (9.18 \text{ e } 9.19)$$

9.2.8. Desaerador

Para a água que sai do desaerador temos o seguinte esquema evidenciado pela Fig.(9.9).

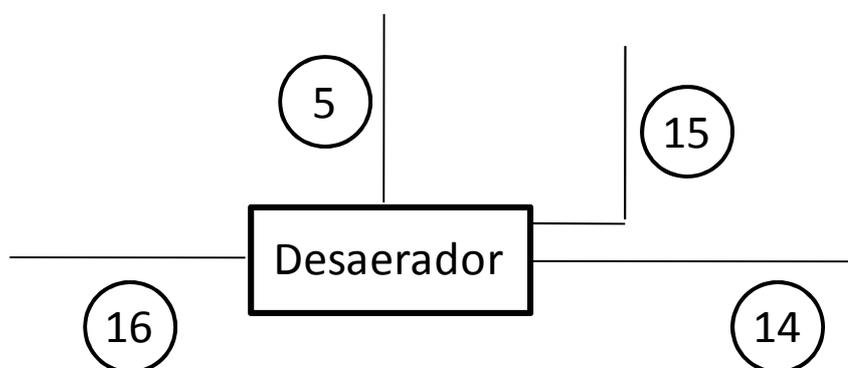


Figura 9.9 – Fluxos no desaerador

$$\begin{aligned} p_{16} &= p_4 = p_5 = p_6 \\ T_{16} &= T_{sat}(p_{16}) - 5 \\ h_{16} &= h(p_{16}, T_{16}) \\ s_{16} &= s(p_{16}, T_{16}) \end{aligned}$$

Aplicando os balanços de massa e energia:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{14} + \dot{m}_{15} + \dot{m}_5 \\ \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_6 h_6 &= \dot{m}_{16} h_{16} \end{aligned} \quad (9.20 \text{ e } 9.21)$$

9.2.9. Bomba da Caldeira

Na entrada da bomba da caldeira o que se pode observar através da Fig.(9.10).

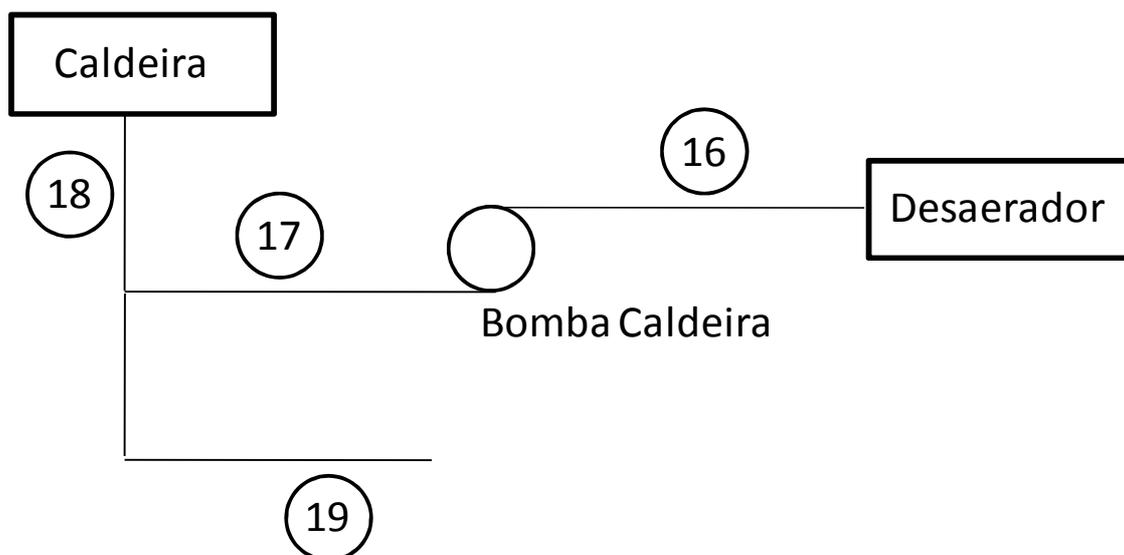


Figura 9. 10 – Fluxos na bomba da caldeira

$p_{17} = p_2$, e defini-se $\eta_{bombacald}$

Aplicando a primeira lei para bombas definimos $h_{17}, s_{17}, T_{17}, x_{17}$

Fazendo os balanços de massa e energia tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{16} &= \dot{m}_{17} \\ \dot{m}_{16}h_{16} + W_{bomba} &= \dot{m}_{17}h_{17} \end{aligned} \quad (9.22 \text{ e } 9.23)$$

Água para a caldeira:

$$\begin{aligned} p_{18} &= p_{17} \\ T_{18} &= T_{17} \\ h_{18} &= h_{17} \\ s_{18} &= s_{17} \end{aligned}$$

Água para o dessuper

$$\begin{aligned} p_{19} &= p_{17} \\ T_{19} &= T_{17} \\ h_{19} &= h_{17} \\ s_{19} &= s_{17} \end{aligned}$$

9.2.10. Equacionamento Global da Planta de Utilidades

Finalmente, pode-se analisar globalmente a planta de utilidades através das equações:

$$W_{liq,total} = W_{contra} + W_{cond} - \left(\frac{W_{bombacond} + W_{bombacald} + W_{bombatorre}}{0,95} \right) - W_{processo} m_{cana} \quad (9.24)$$

$$Eletricidade_{gerada} = W_{liq,total} dias_{safra} tempo_{moagem}^{24} \quad (9.25)$$

$$m_{bagaço} = \left(\frac{W_{liq,total}}{W_{contra} + W_{cond}} \right) m_{bagaco,umido,disponivel} dias_{safra} tempo_{util,moagem}^{24} \quad (9.26)$$

$$Cpacidade_{instalada} = W_{cond} + W_{conta} \quad (9.27)$$

9.3. Análise Exergética

Para a planta de produção de álcool e biodiesel é possível realizar a análise exergética de acordo com a expressão (1.5).

$$(\dot{m} \cdot b)_{saída} - (\dot{m} \cdot b)_{entrada} = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \dot{W} - T_0 \dot{S}_{gerado} \quad (9.28)$$

Ainda, lembrando que $b_e = (h - h_0)_e - T_0(s - s_0)_e$, que $b_s = (h - h_0)_s - T_0(s - s_0)_s$ e que o estado de referência foi definido pela temperatura $T_0 = 25^\circ C$ e pela pressão $p_0 = 100kPa$, pode-se aplicar essas equações para os mesmos volumes de controle a que foram aplicados os balanços de energia e massa para obtermos os valores de exergia e de rendimento exergéticos para todos os

pontos do ciclo. Para o cálculo da exergia associada ao combustível foi utilizada a eq.(9.28). Onde o fator de correção, igual à 1,34, é adotado devido ao combustível estar no estado sólido.

$$b_{comb} = fator_correção \cdot PCI_{cana_açucar} \quad (9.29)$$

Aplicando o balanço exergético, é possível calcular as irreversibilidades associadas aos equipamentos da seguinte maneira:

a) Caldeira

$$\dot{m}_1 * b_1 + \dot{m}_{18} * b_{18} = \dot{m}_2 * b_2 + \dot{I}_{caldeira} \quad (9.30)$$

b) Turbina de Contra Pressão

$$\dot{m}_3 * b_3 = \dot{W}_{turbina_contra} + \dot{m}_4 * b_4 + \dot{I}_{turbina_contra} \quad (9.31)$$

c) Turbina de Condensação

$$\dot{m}_8 * b_8 = \dot{W}_{turbina_cond} + \dot{m}_9 * b_9 + \dot{I}_{turbina_cond} \quad (9.32)$$

d) Processo

$$\dot{m}_7 * b_7 + \dot{Q}_{processo} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cald}} \right) = \dot{m}_{15} * b_{15} + \dot{I}_{processo} \quad (9.33)$$

e) Condensador

$$\dot{m}_9 * b_9 = \dot{m}_{10} * b_{10} + \dot{I}_{condensador} \quad (9.34)$$

f) Bomba do condensador

$$\dot{m}_{10} * b_{10} = -\dot{W}_{bomba_cond} + \dot{m}_{14} * b_{14} + \dot{I}_{bomba_cond} \quad (9.35)$$

g) Bomba Caldeira

$$\dot{m}_{16} * b_{16} = -\dot{W}_{bomba_cald} + \dot{m}_{17} * b_{17} + \dot{I}_{bomba_cald} \quad (9.36)$$

Finalmente, para encerrar a análise termoeconômica, é possível calcular a eficiência exérgica dada pela eq.(9.36).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{l\acute{t}q} + \dot{B}_{processo}}{\dot{m}_{comb} \cdot b_{comb}} \quad (9.37)$$

10. CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS

Determinados os estados termodinâmicos de todos os pontos do ciclo, é possível realizar a análise termoeconômica da planta.

10.1.1. Custo dos equipamentos

É possível calcular o custo dos equipamentos que compõe a planta a partir da seguinte relação proposta por BOEHM (1987) expressa pela eq.(10.1).

$$\dot{C}_{EQ} = \frac{C_{eq}(FRC + f_{O\&M})}{tempo_operação_anual} \quad (10.1)$$

Onde o FRC é calculado de acordo com a eq.(10.2)

$$FRC = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (10.2)$$

E o tempo de operação anual deve ser expresso em segundos de acordo com a eq. (10.3).

$$tempo_operação_anual = 3600 * 24 * dias_safra \quad (10.3)$$

Para a determinação dos custos anuais de aquisição, operação e manutenção dos equipamentos, utilizam-se as seguintes hipóteses:

- Tempo de vida da instalação (20 anos);
- Taxa de juros (i): 15% a.a.;
- Número de horas de operação: 8000 h/ano;
- Fator de operação e manutenção ($f_{O\&M}$):0,06

10.1.2. Balanços de Custos dos Equipamentos

Os balanços de custos podem ser descritos da seguinte maneira:

$$\sum_{entada} c \cdot \dot{B} + \dot{C}_{EQ} = \sum_{saída} c \cdot \dot{B} \quad (10.4)$$

Para o caso de haver mais de uma saída, necessita-se de uma equação adicional, a qual é obtida através dos métodos de partição:

- Método da extração
- Método da Igualdade

Para essa análise será utilizado o método da igualdade que atribui o mesmo custo em base exergética para as saídas de um equipamento.

Aplicando a eq.(9.40) para os pontos do sistema, os mesmos adotados para os balanços de energia e massa, e utilizando o método a igualdade tem-se detalhados os balanços de custos para os equipamentos da planta. É importante salientar que a eletricidade utilizada no funcionamento das bombas provem das turbinas, e, portanto, seu custo é função dos custos da energia elétrica das turbinas de contrapressão e condensação. Ainda, não são considerados os custos do desaerador e do dessuper na análise.

a) Moenda

$$\begin{aligned} \dot{m}_{cana} * b_{cana} * c_{cana} + W_{moagem} * c_{trabalho} * m_{cana} \\ = \dot{m}_{bagaço} * b_{bagaço} * c_{bagaço} + \dot{m}_{caldo} * b_{caldo} * c_{caldo} \end{aligned} \quad (10.5)$$

$$c_{bagaço} = c_{caldo} \quad (10.6)$$

b) Caldeira

$$c_1 * \dot{B}_1 + c_{18} * \dot{B}_{18} + \dot{C}_{caldeira} = c_2 * \dot{B}_2 \quad (10.7)$$

c) Turbina de Contra-Pressão

$$c_8 = c_2 \quad (10.8)$$

$$c_3 * \dot{B}_3 + \dot{C}_{turbina} = c_4 * \dot{B}_4 + W_{contra-pressão} * c_{trabalho_contra} \quad (10.9)$$

$$c_{trabalho_contra} = c_4 \quad (10.10)$$

d) Dessuper

$$c_4 = c_6 \quad (10.11)$$

$$c_6 * \dot{B}_6 + c_{19} * \dot{B}_{19} = c_7 * \dot{B}_7 \quad (10.12)$$

e) Turbina de Condensação

$$c_2 = c_8 \quad (10.13)$$

$$c_8 * \dot{B}_8 + \dot{C}_{turbina_cond} = c_9 * \dot{B}_9 + W_{condensação} * c_{trabalho_condensação} \quad (10.14)$$

$$c_{trabalho_condensação} = c_9 \quad (10.15)$$

f) Condensador

$$c_9 * \dot{B}_9 + \dot{C}_{condensador} = c_{10} * \dot{B}_{10} \quad (10.16)$$

g) Bomba do Condensador

$$c_{10} * \dot{B}_{10} + \dot{C}_{bomba_condensador} + W_{bomba_cond} * \frac{(c_{trabalho_contra} * W_{contra} + c_{trabalho_condensação})}{(W_{contra} + W_{condensação})} = c_{14} * \dot{B}_{14} \quad (10.17)$$

h) Processo

$$c_7 = c_{15} \quad (10.18)$$

i) Desaerador

$$c_4 = c_5 \quad (10.19)$$

$$c_{14} * \dot{B}_{14} + c_{15} * \dot{B}_{15} + c_5 * \dot{B}_5 = c_{16} * \dot{B}_{16} \quad (10.20)$$

j) Bomba da caldeira

$$c_{16} * \dot{B}_{16} + \dot{C}_{bomba_caldeira} + W_{-bomba_cald} * \frac{(c_{trabalho_contra} * W_{contra} + c_{trabalho_condensação})}{(W_{contra} + W_{condensação})} = c_{17} * \dot{B}_{17} \quad (10.21)$$

h) Nó na entrada da caldeira

$$c_{17} = c_{18} \quad (10.22)$$

$$c_{17} = c_{19} \quad (10.23)$$

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PLANTA DE UTILIDADES

Este tópico tem por objetivo elucidar os parâmetros utilizados na simulação computacional da planta de utilidades, baseada no equacionamento descrito no item 9, bem como apresentar resultados parciais relativos à quantidade produzida dos combustíveis que serão importantes no desenvolvimento subsequente do trabalho.

10.2. Parâmetros relativos à produção de álcool

A tab.(11.1) evidencia novamente os parâmetros relativos à produção de álcool que serão utilizados para a determinação da produção anual da planta.

Tabela 11. 1 – Parâmetros relativos à produção de álcool.

Parâmetro	Valor
Moagem/ano safra (toneladas de cana)	3.000.000
Dias úteis/ano safra	238
Tempo útil de moagem de cana	85%
Relação bagaço/cana (t/tc)	0,266
Rendimento Industrial (litros álcool/tc)	88
Vapor do processo (t/tc)	0,2464
Energia elétrica para o processo (kWh/tc)	30

10.3. Parâmetros para a Produção de Biodiesel

A fim de se manter uma base igual à que foi adotada para o modelo de produção do álcool, os parâmetros de produção do biodiesel serão dados em função da quantidade de cana de açúcar moída. Para tanto é necessário que se conheça o rendimento da planta de álcool expresso em litros de álcool por tonelada de cana de açúcar moída.

Assim, tem-se:

$$\frac{\text{litros}_{\text{biodiesel}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} = \frac{\text{litros}_{\text{biodiesel}}}{\text{litros}_{\text{álcool}}} \cdot \frac{\text{litros}_{\text{álcool}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} \quad (11.1)$$

$$\frac{\text{consumo}_{\text{álcool}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} = \frac{\text{litros}_{\text{biodiesel}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} \cdot \frac{\text{litros}_{\text{álcool}}}{\text{litros}_{\text{biodiesel}}} \quad (11.2)$$

$$\frac{\text{consumo}_{\text{óleo}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} = \frac{\text{litros}_{\text{óleo}}}{\text{litros}_{\text{biodiesel}}} \cdot \frac{\text{litros}_{\text{biodiesel}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} \quad (11.3)$$

$$\frac{\text{consumo}_{\text{vapor}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} = \frac{\text{consumo}_{\text{vapor}}}{\text{litros}_{\text{biodiesel}}} \cdot \frac{\text{litros}_{\text{biodiesel}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} \quad (11.4)$$

$$\frac{\text{consumo}_{\text{energia}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} = \frac{\text{consumo}_{\text{energia}}}{\text{litros}_{\text{biodiesel}}} \cdot \frac{\text{litros}_{\text{biodiesel}}}{\text{tonelada}_{\text{cana}}} \quad (11.5)$$

Em função das equações definidas, pode-se montar a tab(11.2) onde os parâmetros aparecem em função da massa de cana-de-açúcar moída.

Tabela 11. 2 – Parâmetros relativos à produção de biodiesel.

Parâmetro	Valor
Consumo álcool (l/tc)	2.000.000
Consumo óleo (l/tc)	167
Consumo cana (tc/l)	0,001875
Consumo vapor (t/tc)	0,221333
Consumo energia (kWh/tc)	35

10.4. Consumo das Utilidades

A tab.(11.3) apresenta os dados consolidados que permitirão o dimensionamento da planta. Deve-se notar que o consumo total da energia é função das energias gastas na moagem da cana, e nos processos de produção de álcool e biodiesel.

Tabela 11. 3 – Consumos totais de utilidades.

Utilidade	Consumo
Consumo vapor total (t/tc)	0,468
Consumo energia total (kWh/tc)	65

10.5. Parâmetros relativos à Planta de Utilidades

Com relação aos sistemas que compõe a planta de utilidades, foram adotados os seguintes valores para a simulação:

- **Caldeira**

Pressão de operação: 67 bar

Temperatura de operação: 515°C

Rendimento Energético: 0,86

Rendimento da bomba da caldeira: 0,7

- **Turbina de extração de contra-pressão**

Rendimento isoentrópico: 0,82

- **Turbina de Condensação**

Rendimento isoentrópico: 0,78

- **Condensador**

Pressão de operação: 0,1 bar

Água de resfriamento: Pressão 1atm; Temperatura 27°C

Rendimento da bomba do condensador: 0,7

- **Processo**

Temperatura do processo (álcool e biodiesel): 140°C

Pressão: 2,5 bar

11. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O capítulo que segue apresenta os resultados da simulação da planta, desenvolvido tanto através do software EES como em ambiente Excel. Estes resultados foram obtidos através dos balanços mássicos, energéticos e exergéticos e em função dos parâmetros de produção tanto de álcool como de biodiesel.

11.1. Resultados Gerais da Planta

Em função dos parâmetros obtidos chega-se à tab.(12.2) com os resultados gerais da planta. Para efeito desta simulação, é considerado que 25% da produção total de álcool é destinada para a produção de biodiesel. A tab.(12.2) evidencia a produção dos combustíveis nas condições simuladas.

Tabela 12. 1 – Produção dos Combustíveis

Combustível	Produção
Álcool	264.000.000
Biodiesel	400.000.000

Tabela 12. 2 – Resultados Globais da Planta de Utilidades.

Resultados Gerais	Valor
Potência Líquida da planta (kW)	22.450
Eletricidade total gerada (GWh/ano)	109
Capacidade instalada (kW)	63.673
Produção de álcool (l/ano)	264.000.000
Produção de Biodiesel (l/ano)	400.000.000

11.2. Resultados da Análise Exergética

A tab.(12.3) apresenta os valores de exergia calculados para os pontos do sistema. Nota-se que os pontos 11, 12 e 13 não são mostrados por fazerem parte do circuito externo de água de resfriamento do condensador. A exergia do caldo de cana que será utilizada na produção do álcool é 9892 kJ/kg, calculada a partir do PCI da cana de açúcar.

Tabela 12. 3 – Exergias do sistema

Ponto do sistema	Exergia (kJ/kg)
1	9818,0
2	1406,0
3	1406,0
4	641,0
5	641,0
6	641,0
7	626,7
8	1406,0
9	151,8
10	2,8
14	3,1
15	34,3
16	55,6
17	62,89
18	62,89
19	62,89

Dando continuidade à análise exergética, a tab.(12.4) apresenta as irreversibilidades associadas aos equipamentos e processos de obtenção da planta de geração de álcool e biodiesel. Também é apresentado o peso de cada componente da usina na destruição total de exergia.

Tabela 12. 4 – Irreversibilidades do Sistema

Ponto do sistema	Irreversibilidade (kJ/kg)	Irreversibilidade (kJ)	% Total
Caldeira	306.689,0	29.260.000,0	63%
Turbina de Contra-Pressão	11.410,0	954.330,0	2%
Turbina de Condensação	3.634,0	20.627,0	0%
Condensador	1.753,0	20.627,0	0%
Processo	200.974,0	16.140.000,0	35%
Bomba do Condensador	1,1	13,4	0%
Bomba da Caldeira	207,4	20.143,0	0%

Finalmente, através da eq.(9.36) pode-se avaliar o rendimento exergético da configuração, assim, $\eta_{\text{exergético}} = 37,37\%$

11.3. Resultados dos Custos dos Equipamentos

O custo dos equipamentos utilizados na planta pode ser calculado através das eq. (10.1), (10.2), (10.3) e é exibido através da tab.(12.5).

Tabela 12. 5 – Custo dos equipamentos

Equipamento	Custo (US\$)	C_{EQ} (US\$/s)
Caldeira	51.292.139	0,54816545394092
Turbina Cond	12.823.035	0,13704136348523
Turbina CP	12.823.035	0,13704136348523
Condensador	4.274.345	0,04568045449508
Bomba Cond	2.137.172	0,02284022724754
Bomba Cald	2.137.172	0,02284022724754

Para a determinação dos custos de cada ponto do sistema, primeiramente foi determinado o custo da cana de açúcar, obtido junto a Consecana, referente ao mês de outubro de 2008, para o Estado de São Paulo, e convertido para dólares através da

igualdade US\$1,00=R\$2,16, obtida junto ao Banco Central do Brasil. Assim, o custo da cana de açúcar utilizado na simulação é US\$ 12,69. É aplicado então o balanço de custos para o volume de controle definido pela moenda para que sejam determinados os custos tanto do bagaço como do caldo da cana-de-açúcar.

A tab.(12.6) mostra o resultado do custeio para os pontos da planta de utilidades em base energética. Lembrando que o ponto 1 é a entrada da caldeira alimentada com bagaço.

Tabela 12. 6 – Custo Termoeconômico (base energética)

Ponto do sistema	Custo termoeconômico unitário (US\$/kJ)
1	0,00000135
2	0,00001010
3	0,00001010
4	0,00001247
5	0,00001247
6	0,00001247
7	0,00001256
8	0,00001010
9	0,00002355
10	0,00261800
14	0,00303600
15	0,00001256
16	0,00003434
17	0,00003625
18	0,00003625
19	0,00003625

Para a conversão da base energética para a mássica utiliza-se a eq.(12.1).

$$C_{mássico} = C_{energético} * \dot{m} \quad (12.1)$$

Os resultados para a base mássica são evidenciados pela tab.(12.6).

Tabela 12. 7 – Custo Termoeconômico (base mássica)

Ponto do sistema	Custo termoeconômico unitário (US\$/t)
1	13,280
2	14,190
3	14,190
4	7,994
5	7,994
6	7,994
7	7,873
8	14,190
9	3,574
10	7,456
14	9,401
15	0,431
16	1,908
17	2,279
18	2,279
19	2,279

12. CUSTOS

A análise feita até o presente momento atribui custos aos pontos arbitrados do sistema. A partir destes valores, e identificando os outros custos necessários, é possível quantificar os custos associados à produção dos combustíveis. Também é possível identificar os custos referentes à planta de utilidades que opera em paralelo à produção dos combustíveis.

12.1. Custos Relativos à Planta de Utilidades

A planta de utilidades é responsável por prover a toda usina vapor e energia elétrica. A energia elétrica gerada pela turbina de contra-pressão é prioritariamente utilizada nos processos de obtenção do álcool e do biodiesel. A potência líquida excedente, juntamente com a da turbina de condensação são responsáveis por gerar a eletricidade destinada à venda no mercado. Dessa forma o custo da eletricidade da planta pode ser definido pela média ponderada dos custos na saída das turbinas, e é representada pela eq.(13.1).

$$C_{eletricidade} = \frac{C_{el_contra-pressão} * W_{contra-pressão} + C_{el_condensação} * W_{condensação}}{W_{contra-pressão} + W_{condensação}} \quad (13.1)$$

Os custos associados à produção das utilidades foram obtidos através dos balanços de custos e são mostrados na tab.(13.1).

Tabela 13. 1 – Custos das Utilidades da Planta de Utilidades

Utilidade	Custo
Vapor Processo (US\$/t)	7,994
Energia Elétrica (US\$/MWh)	51,870

Para completar a análise de custos da planta de utilidades, é necessário contabilizar o investimento inicial feito em equipamentos. A relação R\$ 2900/kW sugere que sejam gastos esse montante para cada kW de potência instalada. A

tab.(13.2) evidencia o investimento inicial necessário e a tab.(13.3) mostra a disposição destes gastos entre os equipamentos da planta de utilidades. O excedente que não está contabilizado nos custos dos equipamentos é referente á obra civil.

Tabela 13. 2 – Composição dos investimentos na Planta de Utilidades.

Potência Instalada (kW)	Investimento (MUS\$)
63.673	85,49

Tabela 13. 3 – Composição dos investimentos na Planta de Utilidades.

Equipamento	Custo (US\$)
Caldeira	51.292.139
Turbina Cond	12.823.035
Turbina CP	12.823.035
Condensador	4.274.345
Bomba Cond	2.137.172
Bomba Cald	2.137.172

12.2. Custos Relativos à produção do Álcool

A Fig.(13.1) ilustra a composição dos custos para a produção do álcool combustível na planta.

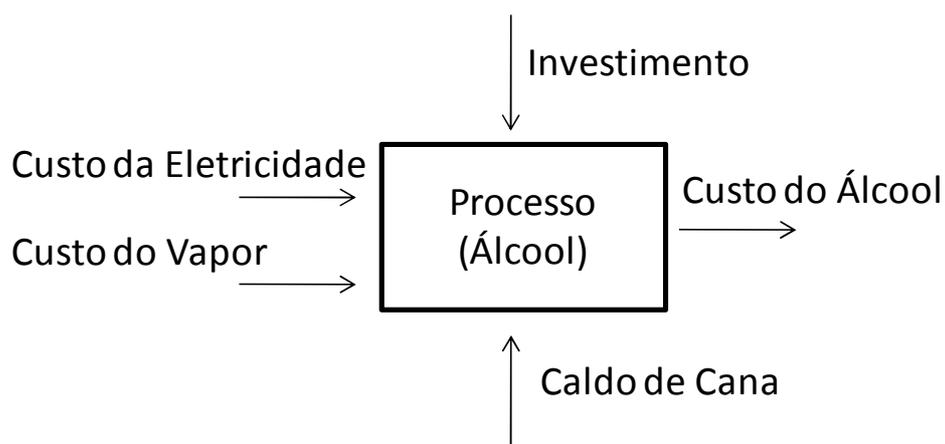


Figura 13. 1 – Composição dos custos do álcool

12.2.1. Custo das Utilidades

A partir dos cálculos da análise termoeconômica, é possível determinar o custo das utilidades no processo de produção do álcool. A tab.(13.4) evidencia o custo das utilidades em relação à produção de álcool.

Tabela 13. 4 – Custo das Utilidades

Utilidade	Custo (US\$/litro de álcool)
Energia Elétrica	0,017683
Vapor	0,049963

12.2.2. Investimento

Uma parte importante que compõe os custos do álcool é o investimento inicial necessário em maquinário para o processo. De acordo com o que foi gasto pela Cosan, em Agosto de 2008, de investimento na construção de uma usina de processamento de cana-de-açúcar, em Goiás, são necessários 70 reais de investimento por tonelada de cana plantada. A produção anual de cana-de-açúcar é 3.000.000 de toneladas. Assim, o investimento associado a essa plantação é dado pela tab.(13.5).

Tabela 13. 5 – Investimento para o processo de produção de álcool

Cana Plantada (t/ano)	Investimento (MUS\$)⁶
3.000.000	97,222

12.2.3. Custo do Álcool

Conhecidos os custos das utilidades vapor e eletricidade, o investimento inicial em equipamentos, e o custo da cana de açúcar, é possível determinar o custo total de produção do álcool, explicitado pela tab.(13.6).

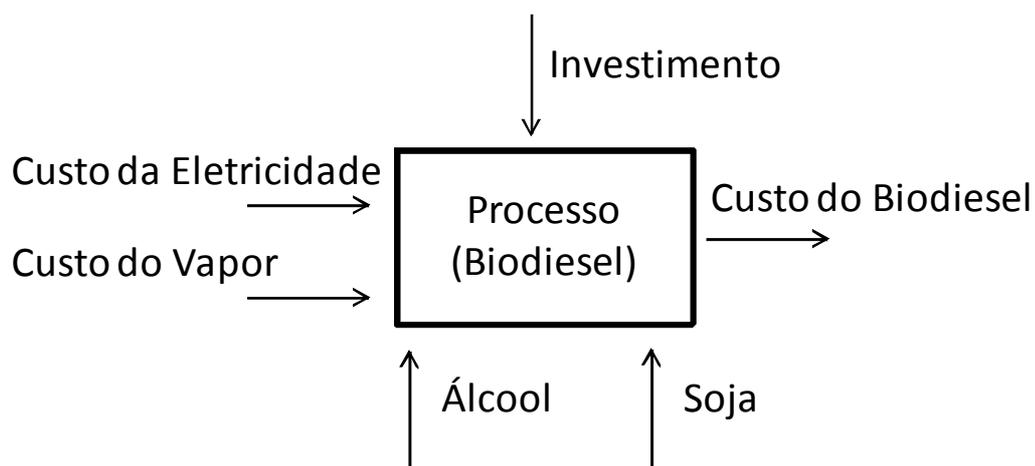
⁶ US\$1,00=R\$2,16 , Dólar médio do mês de outubro de 2008. Fonte: Banco Central do Brasil

Tabela 13. 6 – Custo de Produção do Álcool

Utilidade	Custo (US\$/litro de álcool)
Energia Elétrica	0,017683
Vapor	0,049963
Caldo de cana	0,000111
Investimento	0,018413
Total	0,086170

12.3. Custos Relativos à produção do Biodiesel

A Fig.(13.2) ilustra a composição dos custos para a produção do biodiesel na planta.

**Figura 13. 2** – Composição dos custos do biodiesel

12.3.1. Custo das Utilidades

A partir dos cálculos da análise termoeconômica, é possível determinar o custo das utilidades no processo de produção do biodiesel. A tab.(13.7) evidencia o custo das utilidades em relação à produção de biodiesel.

Tabela 13. 7 – Custo das Utilidades destinadas à produção de biodiesel

Utilidade	Custo (US\$/litro de biodiesel)
Energia Elétrica	0,003404
Vapor	0,033175

12.3.2. Investimento

Uma parte importante que compõe os custos do biodiesel é o investimento inicial necessário em maquinário para o processo. Para efeito deste trabalho, é considerado que o investimento para o processo de biodiesel é 50 % maior que para o de álcool.

Tabela 13. 8 – Investimento para o processo de produção de biodiesel

Processo	Investimento (MUS\$)
Álcool	97,222
Biodiesel	145,833

12.3.3. Custo do Biodiesel

Conhecidos os custos das utilidades vapor e eletricidade e o investimento inicial em equipamentos, é possível determinar o custo total de produção do biodiesel, explicitado pela tab.(13.9). A produção de álcool considerada é a simulada, ou seja, 264.000.000 litros por ano.

Tabela 13. 9 – Custo de Produção de Biodiesel

Utilidade	Custo (US\$/litro de biodiesel)
Energia Elétrica	0,0034040
Vapor	0,0331751
Álcool	0,0142180
Soja	0,3712400
Investimento	0,0182291
Total	0,4402662

13. CONFIGURAÇÕES DA PLANTA

A partir dos resultados de custo obtidos através da análise exergética, é possível encontrar uma configuração da planta de utilidades onde o custo é mínimo.

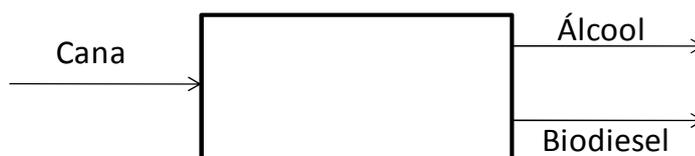


Figura 14. 1 – Esquema da planta

Pode-se variar a taxa de produção entre o álcool e o biodiesel e, com base no critério a seguir descrito encontrar uma configuração melhor para a planta.

- Maximização da Margem – Neste caso serão associados valores que podem ser obtidos através de publicações especializadas para o preço do álcool, do biodiesel e da energia elétrica que serão vendidos. A partir destes dados será calculada a receita bruta da planta e descontados os custos associados à produção dos combustíveis e a planta de utilidades tem-se a margem bruta que, no melhor cenário, deve ser maior.

13.1. Cenários Alternativos da Configuração da Planta

Para que seja feita a análise, serão elaborados três cenários distintos, com produção variável dos combustíveis.

- a) Cenário I – Mesmas configurações as que foram simuladas na primeira parte do trabalho. Nestas condições, 25% da produção de álcool são destinadas à produção de biodiesel.

Tabela 14. 1 – Cenário I

Utilidade	Vendas Anuais
Álcool (l/ano)	132.000.000
Biodiesel (l/ano)	200.000.000
Energia Elétrica (MWh/ano)	109.000

- b) Cenário II – Toda a produção de álcool é destinada à produção de biodiesel. Neste caso a planta operaria como uma refinaria de biodiesel.

Tabela 14. 2 – Cenário II

Utilidade	Vendas Anuais
Álcool (l/ano)	0
Biodiesel (l/ano)	1.600.000.000
Energia Elétrica (MWh/ano)	109.000

- c) Cenário III – Produção igual de álcool e biodiesel. Neste caso, 14% da produção de álcool são destinadas à produção de biodiesel.

Tabela 14. 3 – Cenário III

Utilidade	Vendas Anuais
Álcool (l/ano)	226.609.442
Biodiesel (l/ano)	226.609.442
Energia Elétrica (MWh/ano)	109.000

13.2. Maximização da Margem

A maximização da margem consiste em encontrar a receita associada à venda dos combustíveis e descontar dela a parcela correspondente dos custos dos combustíveis. A seguir serão explicitadas as receitas relativas à venda de cada combustível bem como os custos a fim de se obter uma margem pra cada cenário proposto.

13.2.1. Receita Bruta

Para a maximização da margem obtida com a venda das utilidades serão associados preços de venda praticados no mercado brasileiro ao álcool, biodiesel e

eletricidade. Assim, através de dados encontrados em literatura especializada têm-se a tab.(14.4) com os seguintes preços:

Tabela 14. 4 – Preço de venda

Produto	Preço
Álcool Hidratado (US\$/l)	0,34180 ⁷
Biodiesel (US\$/l)	1,47465 ⁸
Eletricidade (US\$/MWh)	55,5556 ⁹

As tab.(14.5) e (14.6) mostram os resultados para a simulação de receita para os cenários I, II e III de acordo com a venda anual prevista dos combustíveis.

Tabela 14. 5 – Receita obtida através do Cenário I

Utilidade	Receita Bruta (MUS\$/ano)
Álcool	45,118
Biodiesel	294,931
Energia Elétrica	6,056
Total	346,104

Tabela 14. 6 – Receita obtida através do Cenário II

Utilidade	Receita Bruta (US\$/ano)
Álcool	-
Biodiesel	2.359,447
Energia Elétrica	6,056
Total	2.365,503

⁷ Fonte: CEPEA – Preço à vista cotado em dólar no mês de outubro de 2008 – Preço pago pelo revendedor FOB

⁸ Fonte: Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e Lubrificantes – Preço médio do mês de outubro pago pelo revendedor FOB. Dólar médio do mês de outubro US\$1,00=R\$2,17 – Banco Central do Brasil

⁹ Fonte: CCEE – preço à vista da energia elétrica praticado na região Centro-Sudeste. Dólar médio do mês de outubro US\$1,00=R\$2,17 – Banco Central do Brasil

Tabela 14. 7 – Receita obtida através do Cenário III

Utilidade	Receita Bruta (US\$/ano)
Álcool	77,455
Biodiesel	334,171
Energia Elétrica	6,056
Total	417,681

A análise dos resultados mostra que é mais vantajoso, do ponto de vista da receita bruta alcançada, é a maior venda de biodiesel. Dessa forma a produção de álcool deve ser destinada majoritariamente à produção de biodiesel. A receita proveniente da venda de energia elétrica é constante nos três cenários avaliados e deve ser analisada como apenas complementar e não como fonte principal de renda.

13.2.2. Custos Relacionados

A fim de se conseguir uma análise mais completa, deve-se não apenas avaliar a receita da venda dos combustíveis e da energia excedente, mas também os custos associados à produção dos mesmos. As tab.(14.8), (14.9) e (14.10) a seguir mostram os custos relacionados à produção de cada combustível e da eletricidade para cada um dos cenários. Estes custos incluem parcelas referentes ao investimento inicial necessário para a implementação do processo, o custo do vapor e da eletricidade além do custo da cana-de-açúcar e, no caso do biodiesel o custo da soja.

Tabela 14. 8 – Custos relativos ao cenário I

Utilidade	Custo (MUS\$/ano)
Álcool	11,374
Biodiesel	88,053
Energia Elétrica	5,654
Total	105,081

Tabela 14. 9 – Custos relativos ao cenário II

Utilidade	Custo (MUS\$/ano)
Álcool	-
Biodiesel	682,551
Energia Elétrica	5,654
Total	688,205

Tabela 14. 10 – Custos relativos ao cenário III

Utilidade	Custo (MUS\$/ano)
Álcool	19,527
Biodiesel	102,929
Energia Elétrica	5,654
Total	128,110

Os custos de produção do biodiesel são significativamente maiores que os do álcool. Isso se deve principalmente pelo custo adicional da soja na composição dos custos do biodiesel. A seguir, avalia-se como se comporta a margem para cada um dos cenários avaliados.

13.2.3. Margem Bruta

A partir dos custos calculados, é possível determinar a margem bruta de cada configuração através da eq.(14.1). Os resultados estão explicitados nas tab.(14.11), (14.12) e (14.13).

$$MARGEM_BRUTA = RECEITA_BRUTA - CUSTOS \quad (14.1)$$

Tabela 14. 11 – Margem Bruta do cenário I

Utilidade	Margem Bruta (MUS\$/ano)
Álcool	33,743
Biodiesel	206,878
Energia Elétrica	0,402
Total	241,023

Tabela 14. 12 – Margem Bruta do cenário II

Utilidade	Margem Bruta (MUS\$/ano)
Álcool	-
Biodiesel	1.676,896
Energia Elétrica	0,402
Total	1.677,298

Tabela 14. 13 – Margem Bruta do cenário III

Utilidade	Margem Bruta (MUS\$/ano)
Álcool	57,928
Biodiesel	231,241
Energia Elétrica	0,402
Total	289,571

14. DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para a simulação da planta de utilidades encontram-se dentro do esperado. A produção anual de 3.000.000 de toneladas de cana-de-açúcar gera bagaço que será queimado e através da turbina de extração de contrapressão fornece 52,5MW de potência. Para os processos de produção do álcool e do biodiesel são necessários aproximadamente 40MW. Assim, a potência excedente da turbina de contrapressão aliada a aproximadamente 11,8MW de potência da turbina de condensação são utilizados para a produção de energia elétrica com o intuito de ser revendida ao mercado.

O balanço exergético realizado na planta de utilidades, como é de se esperar, aponta para a caldeira como maior fonte de irreversibilidades em toda a usina, ou seja, a maior parte da exergia, ou capacidade de se realizar algum efeito útil, é destruída na caldeira seguida dos processos de produção dos combustíveis.

Em relação aos custos inerentes às utilidades eletricidade e vapor e aos custos relativos à produção dos combustíveis álcool e biodiesel, pode-se afirmar que estes se mostram compatíveis com o esperado. O método da igualdade empregado prevê que os custos sejam distribuídos igualmente na saída das turbinas, ou seja, eletricidade e vapor recebem o mesmo peso na composição dos custos.

Em relação aos cenários propostos, nota-se claramente que, apesar dos custos associados ao biodiesel serem maiores que os associados ao álcool, a receita proveniente do primeiro combustível é proporcionalmente maior que essa diferença, o que se traduz em margens maiores à medida que se produz mais biodiesel. Assim, na óptica de custos, deve-se optar por direcionar a produção de álcool para a de biodiesel. Esta afirmação é corroborada pela margem do cenário II (onde todo o álcool é destinado à produção de biodiesel) ser aproximadamente sete vezes maior que a do cenário I (onde 25% do álcool é destinado à produção de biodiesel). Todavia, deve-se ficar claro que a demanda de biodiesel é limitada apesar do crescente incentivo vindo do governo federal, por meio de lei que prevê a adoção do biodiesel no diesel regular. Ainda, de acordo com os resultados dos custos para ambos os combustíveis, o biodiesel ainda é caro em relação ao álcool. Alia-se isso ao fato da volatilidade dos preços da soja ser grande, bem como a sua disponibilidade, uma vez que há uma forte demanda externa pelos grãos, o que pode acarretar falta de

matéria prima para o biodiesel. Assim, deve ficar a cargo da usina fazer seu planejamento de produção de acordo com o mercado. O mercado de biodiesel é estimado em mínimo de 2 bilhões de litros nos anos de 2008 a 2013 devido à obrigatoriedade de 2% na composição do óleo diesel regular (BONOMI, TRIELLI 2006). Estes valores inviabilizam a produção de biodiesel no cenário II, uma vez que a produção da usina representaria 81% da demanda mínima total do Brasil. Assim, deve-se optar por uma configuração mais próxima do cenário III.

Em relação à eletricidade vendida, esta apresenta um complemento interessante para a margem da planta uma vez que se agrega valor ao bagaço de cana. A venda de eletricidade poderá ser ainda mais vantajosa para a usina em situações adversas, como em períodos de racionamento de energia elétrica, onde os preços apresentam elevada alta.

15. REFERÊNCIAS

- Zanetti, A. A., Pelegrinni, L. F., Oliveira Jr., S. “Thermoeconomic Anallysis of a BIGCC Cogenetation System Natural Gas and Sugarcane Bagasse as complementary Feuels”, Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, São Paulo, Brasil
- Velásquez, H. I., Benjumea, P., Oliveira Jr., S. “Exergy and Enviromental Analysis of the Palm Oil Biodiesel Production Process” São Paulo, Brasil
- Pellegrini, L. F., Oliveira Jr., S. “Exergy Efficiency of the Combined Sugar, Ethanol and Eletricity Production and its Dependence of the Exergy Optimization of the Utilities Plants”, Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, São Paulo, Brasil
- Bonomi, A., Poço, J. G. R., Trielli, M. A., 2006, “Biocombustíveis – A Solução Brasileira para uma matriz Energética Sustentável” Revista Brasileira de Engenharia Química, São Paulo, Brasil
- Lamonica, H. M., 2007, “Produção de Vapor e Eletricidade – A Evolução do Setor Sucroalcooleiro” II GERA: Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira, Pirassununga, Brasil
- Ferrari, R. A., Oliveira, V. da S., Scabio, A., 2004, “Biodiesel de Soja – Taxa de Conversão em Ésteres Etfílicos, Caracterização Físico Química e Consumo em Gerador de Energia” Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil
- Olivério, J. L., 2004, “A Indústria Brasileira das Produtoras de Biocombustíveis”, 1º Fórum Brasil-Alemanha de Biocombustíveis, São Paulo, Brasil
- Olivério, J. L., 2007, ” O Processo DHR – Denini Hidrólise Rápida, Produção de Álcool a partir do Bagaço”, Seminário: Produção do Álcool de Celulose do Bagaço e Outras Matérias-Primas, São Paulo, Brasil
- Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., Borgnakke, C., 2003, “Fundamentos da Termodinâmica”, Tradução da 6ª Edição Americana, Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo, Brasil
- Pellegrini, L. F., da Costa, R. P., Oliveita Jr., S. “A Atribuição de Custos em Sistemas Energéticos: A Termoeconomia como base de cálculo”, 2005,

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo, XXV
ENEGEP Porto Alegre, RS, Brasil

ANEXOS

15.1. Anexo A – Programa Implementado no Software EES**"FUNÇÕES PARA CÁLCULO DAS TUBINAS E BOMBAS"**

```

PROCEDURE Turbina(h_entrada; s_entrada; p_saída; ETA_turbina: h_saída; s_saída;
T_saída; x_saída)
hiso = ENTHALPY(Steam_IAPWS; p = p_saída; s = s_entrada)
h_saída = h_entrada - (h_entrada - hiso)*ETA_turbina
s_saída = ENTROPY(Steam_IAPWS; p = p_saída; h = h_saída)
T_saída = TEMPERATURE(Steam_IAPWS; p = p_saída; h = h_saída)
x_saída = QUALITY(Steam_IAPWS; p = p_saída; h = h_saída)
END

```

```

PROCEDURE Bomba(h_entrada; s_entrada; p_saída; ETA_bomba: h_saída; s_saída;
T_saída; x_saída)
hiso = ENTHALPY(Steam_IAPWS; p = p_saída; s = s_entrada)
h_saída = h_entrada + (hiso - h_entrada)/ETA_bomba
s_saída = ENTROPY(Steam_IAPWS; p = p_saída; h = h_saída)
T_saída = TEMPERATURE(Steam_IAPWS; p = p_saída; h = h_saída)
x_saída = QUALITY(Steam_IAPWS; p = p_saída; h = h_saída)
END

```

```

"-----"
"-----"
--"

```

```

"-----"
"*****Secador*****"
"-----"

```

```

"-----"
"!1. Bagaço Úmido (50%)"
"-----"

```

```

horas_operação = dias_safra*(tempo_útil_moagem/100)*24
m_cana_anual*1e6 = m_cana*dias_safra*(tempo_útil_moagem/100)*24
m_bagaço_úmido = razão_bagaço_cana*m_cana
m_bagaço_úmido_disponível = (1-reserva_técnica/100)*m_bagaço_úmido
m_dot[1] = m_bagaço_úmido_disponível/3,6 [(t*s)/(kg*h)]
umidade[1] = 50 [%]
m_caldo=m_cana-m_bagaço_úmido_disponível
W_moagem=15 [kWh/tc]
W_necessario_processos_planta=w_espec_processo*m_cana

```

```

"-----"
"*****Caldeira (67 bar)*****"
"-----"

```

```

"-----"
"!2. Vapor 67 bar"
"-----"

```

```

p[2] = p_caldeira
T[2] = T_caldeira

```

h[2] = ENTHALPY(Steam_IAPWS; p = p[2]; T = T[2])
s[2] = ENTROPY(Steam_IAPWS; p = p[2]; T = T[2])

"-----"

"Balanços de Massa e Energia"

"-----"

m_caldeira = m_dot[2]*3,6
m_dot[18] = m_dot[2]
m_dot[18]*h[18] + m_dot[1]*1750*CONVERT('kcal'; 'kJ')*ETA_caldeira = m_dot[2]*h[2]
m_dot[2] = m_dot[3] + m_dot[8]
Q_caldeira=m_dot[1]*1750*CONVERT('kcal'; 'kJ')*ETA_caldeira
Q_caldeira2=m_dot[2]*h[2]-m_dot[18]*h[18]

Produção_específica_caldeira = m_dot[2]/m_dot[1]

"-----"
"-----"
"--"

"-----"

"****Turbina de Extração-Contrapressão****"

"-----"

"-----"

"!3. Vapor para turbo de contrapressão"

"-----"

p[3] = p[2]
T[3] = T[2]
h[3] = h[2]
s[3] = s[2]

"-----"

"!4. Vapor escape"

"-----"

p[4] = 2,5 [bar]
{ETA_contrapressão = 0.82}
CALL Turbina(h[3]; s[3]; p[4]; ETA_contrapressão: h[4]; s[4]; T[4]; x[4])

"-----"

"Balanços de Massa e Energia"

"-----"

m_vapor_contrapressão = m_dot[4]*3,6
m_dot[4] = m_dot[3]

m_dot[4] = m_dot[5] + m_dot[6]

W_contrapressão = m_dot[4]*3600/consumo_específico_TGB

consumo_específico_TGB = m_dot[4]*3600/((m_dot[4]*(h[3] - h[4]))*0,95)

"-----"
"-----"
"--"

"-----"

"*****Vapor de Escape*****"

"-----"

```

-----
"!5. Escape para desaerador"
-----
p[5] = p[4]
T[5] = T[4]
h[5] = h[4]
s[5] = s[4]

-----
"!16. Escape para o processo"
-----
p[6] = p[4]
T[6] = T[4]
h[6] = h[4]
s[6] = s[4]
-----
--"

-----
*****Dessuper*****
-----

-----
"!7. Saída do Dessuper"
-----
p[7] = p[6]
T[7] = T_processo
h[7] = ENTHALPY(Steam_IAPWS; p = p[7]; T = T[7])
s[7] = ENTROPY(Steam_IAPWS; p = p[7]; T = T[7])

-----
"Balanços de Massa e Energia"
-----
m_dot[6] + m_dot[19] = m_dot[7]
m_água_dessuper = m_dot[19]*3,6
m_dot[6]*h[6] + m_dot[19]*h[19] = m_dot[7]*h[7]
-----
--"

-----
*****Turbina de condensação*****
-----

-----
"!8. Vapor para turbo gerando 12 MW"
-----
p[8] = p[2]
T[8] = T[2]
h[8] = h[2]
s[8] = s[2]

-----
"!9. Vapor para condensação"
-----
p[9] = 0,1 [bar]

```

CALL Turbina(h[8]; s[8]; p[9]; ETA_condensação: h[9]; s[9]; T[9]; x[9])
 {ETA_condensação = 0.79}

"-----"

"Balanços de Massa e Energia"

"-----"

$(m_{\dot{9}} * (h[8] - h[9]) * 0,95) * \text{consumo_específico_TGC} = m_{\text{vapor_condensação}} * 1000$

$m_{\dot{9}} = m_{\text{vapor_condensação}} / 3,6 \text{ [(t*s)/(kg*h)]}$

$m_{\dot{8}} = m_{\dot{9}}$

$W_{\text{condensação}} = m_{\text{vapor_condensação}} * 1000 / \text{consumo_específico_TGC}$

"-----"

"-----"

.."

"-----"

*****Condensador*****"

"-----"

"-----"

"!10. Condensado"

"-----"

$p[10] = p[9]$

$T[10] = T_{\text{SAT}}(\text{Steam_IAPWS}; p = p[10])$

$h[10] = \text{ENTHALPY}(\text{Steam_IAPWS}; p = p[10]; x = 0)$

$s[10] = \text{ENTROPY}(\text{Steam_IAPWS}; p = p[10]; x = 0)$

"-----"

"!11. Água de resfriamento"

"-----"

$p[11] = 1,01325$

$T[11] = 27$

$h[11] = \text{ENTHALPY}(\text{Steam_IAPWS}; p = p[11]; T = T[11])$

$s[11] = \text{ENTROPY}(\text{Steam_IAPWS}; p = p[11]; T = T[11])$

"-----"

"!12. Água de resfriamento para condensador"

"-----"

$p[12] = 2$

ETA_bomba_torre = 0,7

CALL Bomba(h[11]; s[11]; p[12]; ETA_bomba_torre: h[12]; s[12]; T[12]; x[12])

"-----"

"!13. Água de resfriamento saindo do condensador"

"-----"

$p[13] = 1,01325$

$T[13] = 38$

$h[13] = \text{ENTHALPY}(\text{Steam_IAPWS}; p = p[13]; T = T[13])$

$s[13] = \text{ENTROPY}(\text{Steam_IAPWS}; p = p[13]; T = T[13])$

"-----"

"Balanços de Massa e Energia"

"-----"

$m_{\dot{12}} = m_{\dot{11}}$

$m_{\dot{13}} = m_{\dot{12}}$

$m_{\dot{9}} = m_{\dot{10}}$

$m_{\dot{9}} * h[9] + m_{\dot{12}} * h[12] = m_{\dot{10}} * h[10] + m_{\dot{13}} * h[13]$

$m_{\dot{11}} * h[11] + W_{\text{bomba_torre}} = m_{\dot{12}} * h[12]$

```

m_make_up_torre = m_dot[11]*3,6*0,05
Q_condensador=m_dot[10]*h[10]-m_dot[9]*h[9]

```

```

"-----"
"-----"
--"

```

```

"-----"
"*****Bomba do Condensador*****"
"-----"

```

```

"-----"
"!14. Condensado para desaerador"
"-----"

```

```

p[14] = p[5]
ETA_bomba_cond = 0,7
CALL Bomba(h[10]; s[10]; p[14]; ETA_bomba_cond: h[14]; s[14]; T[14]; x[14])

```

```

"-----"
"Balancos de Massa e Energia"
"-----"

```

```

m_dot[10] = m_dot[14]
m_dot[10]*h[10] + W_bomba_cond = m_dot[14]*h[14]

```

```

"-----"
"-----"
--"

```

```

"-----"
"*****Processo*****"
"-----"

```

```

"-----"
"!15. Condensado do processo"
"-----"

```

```

p[15] = p[7]
T[15] = 100{T_SAT(Steam_IAPWS, p = p[15]) - 5}
h[15] = ENTHALPY(Steam_IAPWS; p = p[15]; T = T[15])
s[15] = ENTROPY(Steam_IAPWS; p = p[15]; T = T[15])

```

```

"-----"
"Balanco de Massa"
"-----"

```

```

m_processo = m_espec_vapor_processo*m_cana
m_dot[7] = m_dot[15]
m_dot[7] = m_processo/3,6 [(t*s)/(kg*h)]
Q_processo=m_dot[15]*h[15]-m_dot[7]*h[7]

```

```

"-----"
"-----"
--"

```

```

"-----"
"*****Desaerador*****"
"-----"

```

```

"-----"
"!16. Água saindo do desaerador"
"-----"

```

```

p[16] = p[5]
T[16] = T_SAT(Steam_IAPWS; p = p[16]) - 5
h[16] = ENTHALPY(Steam_IAPWS; p = p[16]; T = T[16])
s[16] = ENTROPY(Steam_IAPWS; p = p[16]; T = T[16])

```

```

"-----"

```

```

"Balanços de Massa e Energia"

```

```

"-----"

```

```

m_vapor_desaerador = m_dot[5]*3,6 [(t*s)/(kg*h)]
m_dot[15] + m_dot[14] + m_dot[5] = m_dot[16]
m_dot[15]*h[15] + m_dot[14]*h[14] + m_dot[5]*h[5] = m_dot[16]*h[16]

```

```

"-----"

```

```

--"

```

```

"-----"

```

```

"***** Bomba da Caldeira *****"

```

```

"-----"

```

```

"-----"

```

```

"!17. Saída da bomba de alimentação da caldeira"

```

```

"-----"

```

```

p[17] = p[2]
ETA_bomba_caldeira = 0,7
CALL Bomba(h[16]; s[16]; p[17]; ETA_bomba_caldeira: h[17]; s[17]; T[17]; x[17])

```

```

"-----"

```

```

"Balanços de Massa e Energia"

```

```

"-----"

```

```

m_dot[16] = m_dot[17]
m_dot[16]*h[16] + W_bomba_caldeira = m_dot[17]*h[17]

```

```

"-----"

```

```

--"

```

```

"-----"

```

```

"!18. Água de alimentação da caldeira"

```

```

"-----"

```

```

p[18] = p[17]
T[18] = T[17]
h[18] = h[17]
s[18] = s[17]

```

```

"-----"

```

```

"!19. Água para o dessuper"

```

```

"-----"

```

```

p[19] = p[17]
T[19] = T[17]
h[19] = h[17]
s[19] = s[17]

```

```

"-----"

```

```

--"

```

```

W_líquido_total = (W_contrapressão + W_condensação) - (W_bomba_cond +
W_bomba_caldeira + W_bomba_torre)/0,95 - w_espec_processo*m_cana
Eletricidade_total_gerada*1e6 = W_líquido_total*dias_saфра*(tempo_útil_moagem/100)*24

```

$m_bagaço_power = (W_líquido_total / (W_contrapressão + W_condensação)) * m_bagaço_úmido_disponível * dias_safra * (tempo_útil_moagem / 100) * 24 / 1000$

$Capacidade_instalada = W_condensação + W_contrapressão$

--"

"!20. Exergias"

-----"

T[0]=25 [C]

T_zero=298 [K]

p[0]=1 [bar]

h[0]=ENTHALPY(steam;p=p[0];T=T[0])

s[0]=ENTROPY(steam;p=p[0];T=T[0])

b_caldo=9892

b_bagaço=1750*CONVERT('kcal'; 'kJ')*1,34

b[1]=1750*CONVERT('kcal'; 'kJ')*1,34

b[2]=(h[2]-h[0])-T_zero*(s[2]-s[0])

b[3]=(h[3]-h[0])-T_zero*(s[3]-s[0])

b[4]=(h[4]-h[0])-T_zero*(s[4]-s[0])

b[5]=(h[5]-h[0])-T_zero*(s[5]-s[0])

b[6]=(h[6]-h[0])-T_zero*(s[6]-s[0])

b[7]=(h[7]-h[0])-T_zero*(s[7]-s[0])

b[8]=(h[8]-h[0])-T_zero*(s[8]-s[0])

b[9]=(h[9]-h[0])-T_zero*(s[9]-s[0])

b[10]=(h[10]-h[0])-T_zero*(s[10]-s[0])

b[14]=(h[14]-h[0])-T_zero*(s[14]-s[0])

b[15]=(h[15]-h[0])-T_zero*(s[15]-s[0])

b[16]=(h[16]-h[0])-T_zero*(s[16]-s[0])

b[17]=(h[17]-h[0])-T_zero*(s[17]-s[0])

b[18]=(h[18]-h[0])-T_zero*(s[18]-s[0])

b[19]=(h[19]-h[0])-T_zero*(s[19]-s[0])

Be[1]=b[1]*m_dot[1]

Be[2]=b[2]*m_dot[2]

Be[3]=b[3]*m_dot[3]

Be[4]=b[4]*m_dot[4]

Be[5]=b[5]*m_dot[5]

Be[6]=b[6]*m_dot[6]

Be[7]=b[7]*m_dot[7]

Be[8]=b[8]*m_dot[8]

Be[9]=b[9]*m_dot[9]

Be[10]=b[10]*m_dot[10]

Be[14]=b[14]*m_dot[14]

Be[15]=b[15]*m_dot[15]

Be[16]=b[16]*m_dot[16]

Be[17]=b[17]*m_dot[17]

Be[18]=b[18]*m_dot[18]

Be[19]=b[19]*m_dot[19]

 --"

"!21. Balaços de Custos"

-----"

C_caldeira=0,54816545394092
 C_turbina_cp=0,13704136348523
 C_turbina_cond=0,13704136348523
 C_condensador=0,04568045449508
 C_bomba_condensador=0,02284022724754
 C_bomba_caldeira=0,02284022724754

custo_cana=12,685

custo_cana*m_cana+W_moagem*m_cana*c_contrapressão*3600=c_bagaço*b_bagaço*m_bagaço_úmido_disponível*1000+c_caldo*b_caldo*m_caldo*1000
 c_bagaço=c_caldo

c[1]=c_bagaço

c[1]*Be[1]+c[18]*Be[18]+C_caldeira=c[2]*Be[2]

c[3]=c[2]
 c[3]*Be[3]+C_turbina_cp=c[4]*Be[4]+W_contrapressão*c_contrapressão
 c_contrapressão=c[4]
 c[4]=c[5]
 c[4]=c[6]

c[6]*Be[6]+c[19]*Be[19]=c[7]*Be[7]

c[8]=c[2]
 c[8]*Be[8]+C_turbina_cond=c[9]*Be[9]+W_condensação*c_condensação
 c_condensação=c[9]

c[9]*Be[9]+C_condensador=c[10]*Be[10]

((W_contrapressão*c_contrapressão+W_condensação*c_condensação)/(W_condensação+W_contrapressão)) = c_ele

c[10]*Be[10]+C_bomba_condensador+W_bomba_cond*c_ele=c[14]*Be[14]

c[7]=c[15]

c[14]*Be[14]+c[15]*Be[15]+c[5]*Be[5]=c[16]*Be[16]

c[16]*Be[16]+C_bomba_caldeira+W_bomba_caldeira*c_ele=c[17]*Be[17]

c[17]=c[18]
 c[17]=c[19]

custo_energia_elétrica=c_ele*3600000

C_Total_por_segundo=C_caldeira+C_turbina_cp+C_turbina_cond+C_condensador+C_bomba_condensador+C_bomba_caldeira+c_massa[1]*Be[1]/1000

$C_{\text{Anual}} = C_{\text{Total por segundo}} * 3600 * \text{horas_opera\c{c}\~{a}\~{o}}$

"!22. Bala\c{c}\~{o}es de Custos em base m\~{a}ssica(toneladas)"

"-----"

$c_massa[1] = c[1] * b[1] * 1000$
 $c_massa[2] = c[2] * b[2] * 1000$
 $c_massa[3] = c[3] * b[3] * 1000$
 $c_massa[4] = c[4] * b[4] * 1000$
 $c_massa[5] = c[5] * b[5] * 1000$
 $c_massa[6] = c[6] * b[6] * 1000$
 $c_massa[7] = c[7] * b[7] * 1000$
 $c_massa[8] = c[8] * b[8] * 1000$
 $c_massa[9] = c[9] * b[9] * 1000$
 $c_massa[10] = c[10] * b[10] * 1000$
 $c_massa[14] = c[14] * b[14] * 1000$
 $c_massa[15] = c[15] * b[15] * 1000$
 $c_massa[16] = c[16] * b[16] * 1000$
 $c_massa[17] = c[17] * b[17] * 1000$
 $c_massa[18] = c[18] * b[18] * 1000$
 $c_massa[19] = c[19] * b[19] * 1000$

$\text{custo_caldo} = c_caldo * b_caldo$
 $\text{custo_vapor_processo} = c_massa[4]$
 $\text{custo_vapor_eletricidade} = c_massa[9]$
 $\text{custo_eletricidade_processo} = c[4] * 3600000$
 $\text{custo_eletricidade_venda} = c[9] * 3600000$

"-----"

 --"

"!21. Bala\c{c}\~{o}es Exerg\~{e}ticos"

"-----"

"Caldeira"

$m_dot[1] * b[1] + m_dot[18] * b[18] = m_dot[2] * b[2] + I_caldeira$

"Turbina de contra pressao"

$m_dot[3] * b[3] = W_contrapress\~{a}\~{o} + m_dot[4] * b[4] + I_turbina_contrapress\~{a}\~{o}$

"Turbina de condensac\~{a}\~{o}"

$m_dot[8] * b[8] = W_condensac\~{a}\~{o} + m_dot[9] * b[9] + I_turbina_condensac\~{a}\~{o}$

"Processo"

$m_dot[7] * b[7] - Q_processo * (1 - T[0] / T_processo) = m_dot[15] * b[15] + I_processo$

"Condensador"

$$m_dot[9]*b[9]=m_dot[10]*b[10]+l_condensador$$

"Bomba do condensador"

$$m_dot[10]*b[10]=-W_bomba_cond+m_dot[14]*b[14]+l_bomba_cond$$

"Bomba da caldeira"

$$m_dot[16]*b[16]=-W_bomba_caldeira+m_dot[17]*b[17]+l_bomba_caldeira$$

"Rendimento Exergético da Planta"

$$rendimento_exergetico=(W_líquido_total-Q_processo*(1-T[0]/T[15]))/(m_dot[1]*b[1])$$

"!Irreversibilidades"

"-----"

$$Irrersibilidade_caldeira=l_caldeira*m_dot[2]$$

$$Irrersibilidade_contra=l_turbina_contrapressão*m_dot[4]$$

$$Irrersibilidade_cond=l_turbina_condensação*m_dot[9]$$

$$Irrersibilidade_processo=l_processo*m_dot[15]$$

$$Irrersibilidade_condensador=l_condensador*m_dot[10]$$

$$Irrersibilidade_bomba_cond=l_bomba_cond*m_dot[14]$$

$$Irrersibilidade_bomba_caldeira=l_bomba_caldeira*m_dot[17]$$