OSVALDO BERNARDO NETO

**INTEGRAÇÃO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE OBTENÇÃO DE
ETANOL ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DE CELULOSE
(2ª GERAÇÃO) NAS ATUAIS USINAS DE PROCESSAMENTO DE
CANA-DE-AÇÚCAR (1ª GERAÇÃO)**

São Paulo

2009

OSVALDO BERNARDO NETO

**INTEGRAÇÃO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE OBTENÇÃO DE
ETANOL ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DE CELULOSE
(2ª GERAÇÃO) NAS ATUAIS USINAS DE PROCESSAMENTO DE
CANA-DE-AÇÚCAR (1ª GERAÇÃO)**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

São Paulo

2009

OSVALDO BERNARDO NETO

**INTEGRAÇÃO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE OBTENÇÃO DE
ETANOL ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DE CELULOSE
(2ª GERAÇÃO) NAS ATUAIS USINAS DE PROCESSAMENTO DE
CANA-DE-AÇÚCAR (1ª GERAÇÃO)**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas

Orientador:
Prof. Doutor Claudio Garcia

São Paulo
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Bernardo Neto, Osvaldo

Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (2ª geração) nas atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar (1ª geração) / O. Bernardo Neto. -- São Paulo, 2009.

137 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1. Biocombustível 2. Energia elétrica 3. Biomassa 4. Energia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor, amigo e orientador Claudio Garcia, que sempre esteve ao meu lado para apoiar a elaboração deste trabalho.

Ao professor Regis Lima Verde e ao Ricardo Correa, que também me orientaram e ajudaram ao longo de minha pesquisa.

À minha esposa Juliana, que me acompanhou na realização deste trabalho e que tem um grande mérito, já que me incentivou e abriu mão de diversas atividades para que pudéssemos realizar esse sonho.

Aos meus pais e minha irmã, que assim como o resto de minha família, sempre estiveram presentes me apoiando. Além disso, meus avôs e a minha avó Rosa, que me orientam e me abençoam na jornada da minha vida.

A Promon Engenharia Ltda. pelo apoio decisivo neste trabalho. A COSAN e seus colaboradores que ajudaram e cederam os dados da unidade industrial de Jatai-GO para elaboração desta dissertação.

Aos meus colegas de pesquisa e aos amigos presentes no meu cotidiano nesses três últimos anos e que tanto contribuíram para esta pesquisa.

E a todos os amigos que fiz no decorrer de minha vida. Saibam que vocês foram, são e serão sempre importantes nas conquistas da minha vida.

RESUMO

A demanda por energia é crescente devido ao desenvolvimento mundial. A energia renovável advinda de Biomassa, na forma de biocombustível e energia elétrica, tem um papel importante no atendimento desse crescimento, devido às políticas de desenvolvimento sustentável e à pressão das organizações mundiais. Este trabalho tem como objetivo demonstrar que a integração de tecnologias de segunda geração, aproveitamento da celulose, em unidades existentes de processamento de cana-de-açúcar (etanol e energia elétrica), resulta em uma melhor eficiência energética, com um aumento de aproximadamente 25% na produção atual, visto que as unidades existentes convertem apenas sacarose em etanol e utiliza o bagaço apenas como insumo para caldeiras de vapor. Além disso, definem-se as plataformas bioquímica e termoquímica, informando o estado atual das principais tecnologias de segunda geração, realizando uma comparação entre as plataformas. Em seguida, é demonstrada a eficiência energética utilizando quatro cenários: cenário I – unidade industrial atual sem aproveitamento do bagaço excedente; cenário II – unidade industrial atual com aproveitamento do bagaço excedente; cenário III – integração parcial com aproveitamento do bagaço excedente e 50% da palha com a tecnologia de *Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine* (BIG/GT); cenário IV – integração total utilizando 100% de bagaço e 50 % da palha com a tecnologia BIG/GT. Na sequência, é realizado um estudo de caso, que simula a integração da tecnologia BIG/GT em uma usina existente de primeira geração, demonstrando os três cenários finais. Conclui-se que as unidades de processamento de cana-de-açúcar, produtoras de etanol e energia elétrica, existentes podem possuir um melhor aproveitamento energético, melhorando as suas instalações de primeira geração, reduzindo o consumo de vapor através de equipamentos eficientes. Porém, a utilização de tecnologias de segunda geração elevam para outro patamar a eficiência energética da planta, mesmo comparado com a primeira geração otimizada. É válido informar que essas novas tecnologias ainda estão em desenvolvimento, possuindo barreiras tecnológicas a serem ultrapassadas, possibilitando o desenvolvimento de diversas linhas de pesquisa. O conhecimento das tecnologias de segunda-geração, tanto da plataforma bioquímica como da termoquímica, e a consideração da utilização dessas tecnologias em curto prazo, no planejamento de ampliações das plantas existentes ou em novos empreendimentos de processamento de cana-de-açúcar que estão

ocorrendo no Brasil, é essencial para um melhor aproveitamento energético da cana-de-açúcar e um bom aproveitamento dos equipamentos que estão sendo implantados.

Palavras-chaves: Etanol, BIG/GT, cana-de-açúcar, eficiência energética

ABSTRACT

The demand for energy has been increasing due to world development. Renewable energy of biomass, biofuel and electric energy have an important role to assist this growth, due to sustainable development policies and to the pressure of global organizations. The main aim of this dissertation is to demonstrate that the integration of second-generation technologies, cellulose utilization, in processing sugar cane units (Ethanol and Electric Energy), results in an increase of the energy efficiency, a rise of 25% in the current production, due to the fact that first-generation technologies convert only sucrose in ethanol and use the bagasse just as fuel to steam-boiler. Besides, this paper brings the concept of biochemical and thermochemical platforms, informing the second-generation status and making a comparison between the platforms. After that, it demonstrates the energy efficiency using four scenarios: Scenario I – present industrial plant without using the bagasse, Scenario II – present industrial plant using the bagasse, Scenario III – parcial integration using the bagasse and 50% sugar cane trash with the BIG/GT technology, Scenario IV- total integration using the bagasse and 50% sugar cane trash with the BIG/GT technology. Besides, it makes a case study that simulates the integration of BIG/GT technology in a real first-generation unit, showing the scenarios II, III and IV. It will be concluded that the existent plants of sugar cane processing, producers of ethanol and electric energy, can increase their energy efficiency, improving their instalation of first-generation, reducing steam consumption through more efficient equipment. Nevertheless, the application of second-generation technology takes to an even higher level the energy efficiency of the unit than the improved first-generation plant. It is important to inform that these new technologies are still being developed, and have to overcome technological barriers, leading to several research lines. The knowledge of second generation technologies, including thermochemical and biochemical platforms, and the possibility to utilize these technologies in a short period of time to plan the amplifications of the existing plants of sugar cane processing or to new ventures that are being established in Brazil, are essencial to a better sugar cane energetic utilization and good use of equipments that are being implanted.

Keywords: bio-ethanol, BIG/GT, sugar cane, energy efficiency

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 - Projeção de consumo e produção de etanol	19
Figura 2-1 - Foto de um descarregador tipo Hilo	28
Figura 2-2 – Foto da deposição de bagaço	29
Figura 2-3 – Metodologia de análise deste estudo	31
Figura 3-1 – Principais áreas de processo de uma unidade de processamento de cana-de-açúcar atual	41
Figura 3-2 – Foto do descarregador e mesa alimentadora	43
Figura 3-3 – Resumo do sistema de preparação da cana e sistema de extração de caldo	46
Figura 3-4 – Foto de uma moenda	46
Figura 3-5 – Foto - Difusor	47
Figura 3-6 – Resumo do sistema de tratamento de caldo	49
Figura 3-7 – Foto de um conjunto de evaporadores	49
Figura 3-8 – Foto de um decantador comum tanque de <i>flash</i>	49
Figura 3-9 – Resumo do sistema de fermentação	50
Figura 3-10 – Foto de uma fermentação contínua	53
Figura 3-11 – Fluxograma esquemático do processo de destilação do tipo ABB1 ...	54
Figura 3-12 – Fluxograma esquemático do processo de desidratação por peneira molecular	58
Figura 3-13 – Esquema de produção de vapor e energia elétrica (bar = bar g)	59
Figura 3-14 – Foto de um sistema de tancagem	60
Figura 4-1 – Definição de Plataformas Bioquímica/Termoquímica	63
Figura 4-2 – Processo Geral - Produção de Etanol - Plataforma Bioquímica	65
Figura 4-3 – Arranjo típico da parede celular vegetal	66
Figura 4-4 - Esquema simplificado da meta do pré-tratamento de biomassa	67
Figura 4-5 - Esquema simplificado do SHF	76
Figura 4-6 - Esquema simplificado do SSF	76
Figura 4-7 - Esquema simplificado do SSCF	77
Figura 4-8 - Esquema simplificado do CBP	77
Figura 4-9 – Processo geral - plataforma termoquímica	79
Figura 4-10 – Gaseificador de leito fixo - contra-corrente	81

Figura 4-11 – Gaseificador de leito fixo - concorrente	82
Figura 4-12 – Gaseificador CFB	82
Figura 4-13 – Gaseificador BFB / CFB	83
Figura 4-14 – Gaseificador de Leito Arrastado	83
Figura 4-15 – Pirólise de leito arrastado	85
Figura 5-1 - Fluxograma de processo simplificado - Cenário I	93
Figura 5-2 - Fluxograma de processo simplificado - Cenário II	94
Figura 5-3 - Esquema simplificado de BIG/GTCC	95
Figura 5-4 - Fluxograma de processo simplificado - Cenário III	96
Figura 5-5 - Esquema simplificado de BIG/GT integrado à planta industrial - Adequação	97
Figura 5-6 - Fluxograma de processo simplificado - Cenário IV	97
Figura 5-7 - Foto aérea da unidade de Jataí -GO	101
Figura 5-8 - <i>Layout</i> da área de processo - Planta industrial de Jataí - COSAN	102
Figura 5-9 - Possível Área de implantação da tecnologia BIG/GTCC	105
Figura I-1 - Memorial de cálculo: Cenário I (A).....	116
Figura I-2 - Memorial de cálculo: Cenário I (B).....	118
Figura I-3 - Memorial de cálculo: Cenário II (A).....	120
Figura I-4 - Memorial de cálculo: Cenário II (B).....	122
Figura I-5 - Memorial de cálculo: Cenário III (A).....	124
Figura I-6 - Memorial de cálculo: Cenário III (B).....	126
Figura I-7 - Memorial de cálculo: Cenário IV (A).....	128
Figura I-8 - Memorial de cálculo: Cenário IV (B).....	130
Figura II-1 - Memorial de cálculo: Estudo de caso II.....	132
Figura II-2 - Memorial de cálculo: Estudo de caso III.....	134
Figura II-3 - Memorial de cálculo: Estudo de caso IV.....	136

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-1 - Demanda Mundial de energia primária no Cenário de Referência em milhões de tonelada de equivalente de óleo (Mtoe).....	17
Tabela 1-2 - Demanda Nacional de energia primária no Cenário de Referência - Mtoe	18
Tabela 1-3 - Cenário de Consumo de Biocombustíveis - Mtoe	19
Tabela 1-4 - Fluxo comparativo de Energia na produção de Etanol – GJ/ha.ano	20
Tabela 1-5 - Unidades de processamento de cana-de-açúcar no Brasil.....	22
Tabela 1-6 - Uso da terra no Brasil em milhões de hectares (2007)	23
Tabela 2-1 - Exemplo de painel decisório - subsistema	37
Tabela 2-2 - Exemplo de painel decisório - sistema.....	38
Tabela 3-1 - Composição básica da cana-de-açúcar	42
Tabela 3-2 - Energia contida na cana-de-açúcar atual.....	42
Tabela 4-1 - Plantas industriais de gaseificação	64
Tabela 4-2 - Percentual típico dos componentes de bagaço de cana-de-açúcar.....	66
Tabela 4-3 - Rendimentos das tecnologias de hidrólise da celulose.....	74
Tabela 4-4 - Características de tecnologias de conversão.....	80
Tabela 4-5 - Plantas comerciais em operação/construção.....	86
Tabela 4-6 - Tecnologias de conversão de biomassa em biocombustíveis e energia elétrica.....	87
Tabela 4-7 - Comparativo de Plataformas bioquímica e termoquímica.....	89
Tabela 5-1 - Principais parâmetros do Cenário I	92
Tabela 5-2 - Principais parâmetros utilizados no Cenário III	96
Tabela 5-3 - Comparação dos resultados dos Cenários (processamento de uma tonelada de cana)	99
Tabela 5-4 - Simulação de Cenários do Estudo de Caso.....	103
Tabela 5-5 - Tabela de comparação de uma ampliação de produção em 1ª geração e uma ampliação com a integração com tecnologia de 2ª Geração	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEAC	Álcool etílico anidro carburante
AEHC	Álcool etílico hidratado carburante
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BIG/GT	<i>Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine</i>
BIG/GTCC	<i>Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine Combined Cycle</i>
CEC	Comissão de Energia da Califórnia
CEST	<i>Condensing Extraction Steam Turbine</i>
COPERSUCAR	Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
DHR	Dedini Hidrólise Ácida
FAO	<i>Food and Agricultural Organization of the United Nations</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IEA	Agência Internacional de Energia
INCOSE	<i>Internacional Council on Systems Engineering</i>
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MEG	Monoetilenoglicol
MTBF	Tempo médio entre falhas (<i>Mean Time Between Failures</i>)
MME	Ministério de Minas e Energia do Brasil
Mtoe	Milhões de tonelada de equivalente de óleo
MTTR	Tempo médio de reparo (<i>Mean Time to Repair</i>)
NIPE	Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OECD	Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i>

PNE	Plano Nacional de Energia
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
UNICA	União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	16
1.1.1	Cenário Energético	16
1.1.2	Biomassa	20
1.1.3	Brasil e Etanol.....	21
1.2	Objetivo	24
1.3	Revisão da Literatura.....	24
1.4	Estrutura da Dissertação	26
2	METODOLOGIA	28
2.1	Introdução.....	28
2.2	Metodologia Planejada (MP) neste trabalho.....	30
2.2.1	Elementos de Análise	32
2.2.2	Painel de Decisão	36
2.3	Metodologia Realizada (MR) neste trabalho.....	38
2.3.1	E1 – Avaliação da tecnologia.....	38
2.3.2	E2 – Eficiência energética	39
2.3.3	E3 – Impactos ambientais.....	39
2.3.4	E4 – Viabilidade econômica.....	39
2.3.5	E5 – Efeito sócio-político	40
3	PROCESSOS DE UMA PLANTA INDUSTRIAL ATUAL	41
3.1	Cana-de-açúcar.....	42
3.2	Recepção da cana-de-açúcar.....	42
3.3	Preparo da cana-de-açúcar e extração do caldo	44
3.4	Tratamento de Caldo	47
3.5	Fermentação	50
3.5.1	Fermentação Batelada.....	51
3.5.2	Fermentação Contínua	51

3.5.3	Comparação entre a fermentação contínua e batelada	53
3.6	Processos de Separação	54
3.6.1	Destilação	54
3.6.2	Desidratação	56
3.7	Processo de Produção de Vapor e Energia	58
3.8	Tancagem e Estações de Carregamento de Álcool	59
3.9	Utilidades	60
4	PROCESSOS DE 2ª GERAÇÃO	62
4.1	Introdução	62
4.2	Plataforma Bioquímica	65
4.2.1	Tratamento Mecânico	67
4.2.2	Pré-tratamento - Hidrólise Hemicelulose	67
4.2.3	Hidrólise Celulose	72
4.3	Plataforma Termoquímica	77
4.3.1	Gaseificação	79
4.3.2	Pirólise	83
4.4	Plantas Comerciais de 2ª Geração	85
4.5	Comparativo da Plataforma Bioquímica e Termoquímica	86
4.5.1	Comparativo da plataforma bioquímica e termoquímica	86
4.5.2	Tendência de aplicação das Plataformas	90
5	INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE 2ª GERAÇÃO EM PLANTAS EXISTENTES	91
5.1	Introdução	91
5.2	Cenários	92
5.2.1.	Cenário I - Planta Atual sem aproveitamento de bagaço excedente	93
5.2.2.	Cenário II - Planta Atual com aproveitamento de bagaço excedente	94
5.2.3.	Cenário III - Planta Atual com aproveitamento do bagaço excedente através da tecnologia BIG/GTCC	95

5.2.4.	Cenário IV - Planta de processamento de cana-de-açúcar 1ª geração integrada à tecnologia BIG/GT	97
5.2.5.	Comparação dos Cenários	98
5.3	Estudo de Caso	99
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS...	106
6.1	Conclusões.....	106
6.2	Trabalhos Futuros	107
	REFERÊNCIAS.....	109
	APÊNDICE I	116
I.1	Memorial de Cálculo - Cenário IA.....	116
I.2	Memorial de Cálculo - Cenário IB.....	118
I.3	Memorial de Cálculo - Cenário IIA.....	120
I.4	Memorial de Cálculo - Cenário IIB.....	122
I.5	Memorial de Cálculo - Cenário IIIA	124
I.6	Memorial de Cálculo - Cenário IIIB	126
I.7	Memorial de Cálculo - Cenário IVA.....	128
I.8	Memorial de Cálculo - Cenário IVB.....	130
	APÊNDICE II	132
II.1	Memorial de Cálculo - Estudo de Caso II	132
II.2	Memorial de Cálculo - Estudo de Caso III	134
II.3	Memorial de Cálculo - Estudo de Caso IV	136

1 Introdução

1.1 Motivação

O crescente interesse mundial na utilização de recursos renováveis devido à consciência que as matérias-primas são finitas, motiva a busca por soluções sustentáveis, que deverão possuir um processo energético mais eficiente e respeitar as questões sócio-ambientais, por exemplo, a questão do dióxido de carbono.

A motivação deste trabalho é demonstrar que a utilização de novas tecnologias pode possibilitar uma otimização no rendimento energético de uma planta industrial.

Nos próximos itens, serão demonstrados os principais motivos para a realização do estudo de otimização em uma planta industrial de processamento de cana-de-açúcar.

1.1.1 Cenário Energético

O cenário energético mundial é um dos principais itens de estudo referente à sustentabilidade, pois a demanda de energia primária é crescente e possui como integrantes majoritários matérias primas não renováveis. A tabela 1.1 demonstra que o crescimento energético anual médio é de 1,6% e que a matriz energética tem como principal fornecedor de energia primária o petróleo.

A Tabela 1.1 também demonstra que as previsões ainda não refletem a mudança na distribuição de energia renovável e não renovável, visto que, em 2030, a distribuição é similar à atual.

Tabela 1-1 - Demanda Mundial de energia primária no Cenário de Referência em milhões de tonelada de equivalente de óleo (Mtoe)

	1980	2004	2010	2015	2030	2004-2030⁽¹⁾
Carvão	1785	2773	3354	3666	4441	1,8 %
Óleo	3107	3940	4366	4750	5575	1,3 %
Gás	1237	2302	2686	3017	3869	2,0%
Nuclear	186	714	775	810	861	0,7 %
Hídrica	148	242	280	317	408	2,0 %
Biomassa	765	1176	1283	1375	1645	1,3 %
Outros renováveis	33	57	99	136	296	6,6 %
Total	7261	11204	12842	14071	17095	1,6 %

Fonte: [IEA, 2006]. Notas: (1) - Taxa média de crescimento anual.

O cenário nacional é informado na tabela 1.2, onde a taxa de crescimento é superior à demanda mundial; porém, uma grande diferença é a utilização de fontes renováveis (hídrica, biomassa e outras), que no Brasil representam aproximadamente 41% e no cenário mundial 13%. Porém, a parcela que cada tipo de energia primária participa não é alterada no decorrer do tempo.

Outro fator de atenção é que a previsão de 2030 é superior ao dobro da demanda de energia de 1990, ou seja, haverá a necessidade de crescimento contínuo na produção de energia primária.

Tabela 1-2 - Demanda Nacional de energia primária no Cenário de Referência - Mtoe

	1990	2004	2015	2030	2004-2030 ⁽¹⁾
Carvão	9,7	14,2	15,1	18,0	0,9 %
Óleo	57,7	84,8	108,4	141,7	2,0 %
Gás	3,2	15,8	25,9	41,2	3,8 %
Nuclear	0,6	3,0	6,3	6,3	2,9 %
Hídrica	17,8	27,6	38,0	50,0	2,3 %
Biomassa	41,6	54,4	70,6	89,8	1,9 %
Outros renováveis	0,0	0,0	0,5	1,9	25,4 %
Total	130,6	199,8	264,8	348,8	2,1%

Fonte: [IEA, 2006]. Notas: (1) - Taxa média de crescimento anual.

Particularizando-se a análise energética para o consumo de biocombustíveis, pode-se verificar um crescimento de quase seis vezes na produção atual em 25 anos, conforme demonstrado na Tabela 1.3 no cenário de referência. Entretanto, quando analisamos o cenário alternativo, que possui uma interferência política maior na decisão da matriz energética, verifica-se um aumento de 10 vezes nos anos de 2004 a 2030. A figura 1.1, obtida do Plano Nacional de Energia (PNE) 2030, também demonstra o crescimento de consumo e produção do etanol.

Um dos fatores para esse crescimento é a questão da legislação, pois vários países estão adotando metas de utilização de combustíveis renováveis. Por exemplo, a Índia está promovendo incentivo fiscal para aumento do consumo de biocombustíveis. Além disso, existe a questão da utilização da mistura de biocombustíveis em combustíveis fósseis, como o aumento do percentual de etanol na gasolina.

Tabela 1-3 - Cenário de Consumo de Biocombustíveis - Mtoe

	2004	2010 ⁽¹⁾	2010 ⁽²⁾	2015 ⁽¹⁾	2015 ⁽²⁾	2030 ⁽¹⁾	2030 ⁽²⁾
OECD	8,9	30,5	34,7	39,0	51,6	51,8	84,2
Economia Transição	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5
Países em Desenvolvimento	6,5	10,9	14,0	15,3	21,1	40,4	62,0
Mundial	15,5	41,5	48,8	54,4	73,0	92,4	146,7

Fonte: [IEA, 2006]. Notas: (1) - Taxa média de crescimento anual; (2) cenário alternativo com políticas públicas.

Figura 1-1 - Projeção de consumo e produção de etanol [BRASIL, 2007].

Considerando o cenário demonstrado na Tabela 1.3, nota-se a importância da otimização no sistema de produção de biocombustíveis em unidades de processamento de cana-de-açúcar, já que existe uma necessidade desse desenvolvimento para a obtenção dos valores previstos. É interessante ressaltar que um dos objetivos deste trabalho é demonstrar que, utilizando praticamente a mesma quantidade de matéria-prima, pode-se obter um incremento de 25% na produção atual.

1.1.2 Biomassa

A escolha da cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis possui dois principais motivos: o rendimento energético e a proximidade da realidade brasileira, visto que o Brasil é um dos líderes de mercado e de tecnologia nesse tipo de cultura. O rendimento energético obtido através do processamento da cana-de-açúcar é um dos maiores. Isso pode ser observado em diversos estudos de balanço de energia. A Tabela 1.4 demonstra a relação de energias que são geradas e consumidas durante o processo de produção dos biocombustíveis relativo à sua matéria-prima, sendo que a relação de energia total para a cana-de-açúcar é em média de 8 a 9 vezes.

Tabela 1-4 - Fluxo comparativo de Energia na produção de Etanol – GJ/ha.ano

Processo	Milho ⁽¹⁾	Switchgrass ⁽¹⁾	Cana-de-açúcar ⁽²⁾
Consumo de energia na produção	18,9	17,8	13,9
Energia da biomassa	149,5 ⁽³⁾	220,2	297,1 ⁽⁴⁾
Relação energética agrícola	7,9	12,3	21,3
Consumo de energia na produção de etanol	47,9	10,2	3,4
Energia contida no etanol	67,1 ⁽⁵⁾	104,4	132,5 ⁽⁶⁾
Relação de energia total	1,21	4,43	8,32

Fonte: [LEAL, 2007a]. Notas: (1) - Fonte: *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL); (2) - Fonte: *Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (COPERSUCAR) / Universidade estadual de Campinas (UNICAMP)*; (3) - não inclui aproveitamento dos resíduos do milho; (4) - não inclui o uso de folhas; (5) - inclui crédito para co-produtos; (6) - inclui crédito para excedente de bagaço 8%.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo [FAO, 2008]. Atualmente, possui uma produção anual (safra 2007/2008) de 489,2 milhões toneladas de cana, conforme estudo do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) [BRASIL, 2008a]. Além disso, é importante ressaltar que o Brasil possui uma produção quase duas vezes maior que o segundo lugar, a Índia, conforme dados da *Food and Agricultural Organization of the United Nations* (FAO).

Este estudo é fundamentado também na questão do crescimento da produção de matéria-prima, visto que existe previsão de produção de 849 milhões de toneladas de cana para 2020 e 1140 milhões de toneladas em 2030 [BRASIL, 2007].

1.1.3 Brasil e Etanol

O Brasil é conhecido mundialmente como referência na tecnologia de produção de cana-de-açúcar e de etanol, já que é um dos principais produtores desses itens.

A história da produção de cana-de-açúcar no Brasil é antiga; porém, em 1931, o governo solicitou a adição de 5% de etanol na gasolina. Após a crise do petróleo em 1973, o governo brasileiro criou o Programa Nacional de Álcool (Proálcool) em 1975, através do qual foi lançado o primeiro carro movido totalmente a álcool (1979) e houve um aumento no teor de etanol na gasolina de 5% para 20 a 25%.

Atualmente, existem, no Brasil, aproximadamente 418 usinas de processamento de cana-de-açúcar, sendo 155 produtoras de álcool, 15 produtoras de açúcar e 248 produtores de álcool e açúcar [BRASIL, 2008b]. O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, com uma produção anual de 22,2 milhões de m³ [BRASIL, 2008c], cerca de 38% da produção mundial. Na safra de 2007/2008, foram processadas 489 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o que representa 14% da matriz energética do país [BRASIL, 2007].

É interessante também notar a questão do aumento expressivo na implantação de novas usinas de processamento de cana-de-açúcar, já que há uma boa previsão de consumo de biocombustível devido à questão ambiental e à elevação do preço do petróleo. A Tabela 1.5 demonstra esse crescimento no número de usinas e também informa o aumento de 26% em unidades de processamento de cana em seis anos, o que implica em um crescimento médio anual de 4,5%. Além disso, quando se realiza a análise com o foco do processamento de cana-de-açúcar, verifica-se um crescimento de 71% em seis anos.

Tabela 1-5 - Unidades de processamento de cana-de-açúcar no Brasil

Região	Unidades de Processamento		Cana (Mt)		Participação	
	2006/2007	2012/2013	2006/2007	2012/2013	2006/2007	2012/2013
N/NE	74	75	53	60	12,46%	8,24%
SP	148	179	264	387	62,06%	53,11%
MG	25	45	29	79	6,83%	10,90%
MS	10	23	12	59	2,74%	8,04%
MT	11	11	13	18	3,10%	2,45%
PR	27	31	32	56	7,52%	7,65%
GO	15	32	16	57	3,79%	7,85%
RJ	8	9	3	7	0,81%	0,98%
ES	6	6	3	6	0,68%	0,77%
RS	1	1	0	0	0,02%	0,03%
Total	325	412	425	729	100,00%	100,00%

Fonte: [CARVALHO, 2007].

Outro fator importante para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é a possibilidade de crescimento sustentável, visto que, pela Tabela 1.6, a área de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é relativamente pequena, perto da área total arável. Isso significa que existe área para o crescimento da produção de cana-de-açúcar, sem impacto direto na cultura de alimentos.

Tabela 1-6 - Uso da terra no Brasil em milhões de hectares (2007)

BRASIL	851	% do total	% terras
Total de terras aráveis	354,8	de terras	aráveis
1. Área cultivada – total	76,7	9,0%	21,6%
1.1 – Soja	20,6	2,4%	5,8%
1.2 – Milho	14	1,6%	3,9%
1.3 – Cana-de-açúcar	7,8	0,9%	2,2%
1.3.1 – Cana-de-açúcar para etanol	3,4	0,4%	1,0%
1.4 – Laranja	0,9	0,1%	0,3%
2. Pastagem	172,3	20%	49%
3. Área disponível (total arável – área cultivada – pastagem)	105,8	12%	30%

Fonte: [SOUZA, 2009].

É interessante ressaltar que as atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar no Brasil utilizam a tecnologia de obtenção de etanol através da fermentação da glicose obtida da cana, conforme a seguinte reação química:

Esse processo é conhecido como tecnologia de primeira geração de obtenção de etanol e possui um rendimento energético de aproximadamente 30% de toda a energia contida na cana-de-açúcar, devido ao aproveitamento apenas da sacarose contida na cana-de-açúcar; ou seja, não existe aproveitamento do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, que são considerados resíduos.

1.2 Objetivo

Neste trabalho, tem-se como objetivo estudar a otimização do rendimento energético das unidades de processamento de cana-de-açúcar existentes, tendo como meta o rendimento energético superior a 40%, através da integração de novas tecnologias nas usinas existentes. São demonstradas as principais arquiteturas possíveis de integração das novas tecnologias com plantas existentes, considerando os principais ganhos de produção e as barreiras tecnológicas a serem superadas, através de uma análise sistêmica da unidade industrial.

Essas novas tecnologias implicam na obtenção de etanol celulósico (2º geração), que aproveita o material celulósico contido na cana-de-açúcar como insumo do processo, resultando em um melhor rendimento energético. Essa matéria-prima é, basicamente, o bagaço e a palha. É válido ressaltar que a utilização dessas tecnologias estará agregando valor a essa produção, visto que o bagaço já está dentro da usina e a palha já está produzida; ou seja, tem-se apenas o incremento de custo de implantação devido aos novos equipamentos necessários para economia de bagaço e o custo operacional de coleta e transporte da palha.

A dissertação contribui para a literatura relativamente escassa em língua portuguesa, sobre a integração de tecnologias de etanol de 2º geração em plantas industriais existentes. Pretende-se fornecer um conjunto coerente e conciso de conhecimento que poderá servir de base para estudos acadêmicos e conceituais, de viabilidade e projetos básicos de engenharia, que, seguramente, estarão em curso no Brasil, como parte do desenvolvimento de sua matriz e de sua integração energética nos próximos anos.

1.3 Revisão da Literatura

O processamento de cana-de-açúcar para aproveitamento de sacarose através do açúcar é muito antigo. Há relatos que o início desse aproveitamento foi realizado em 350 D.C. na dinastia Gupta; porém, há indícios arqueológicos que esse aproveitamento já ocorria em 6000 A.C. Entretanto, a mecanização da produção do açúcar começou no século XVIII, tendo sua evolução incrementada no século XIX.

Já a utilização de fermentação industrializada para obtenção do álcool foi iniciada no final do século XIX, para fins de combustível e uso industrial.

Este trabalho tem como um dos objetivos demonstrar as principais características das unidades atuais de processamento de cana-de-açúcar para produção do etanol combustível, que, pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), pode ser obtido de duas maneiras: álcool etílico hidratado carburante (AEHC) ou álcool etílico anidro carburante (AEAC). O AEAC possui teor alcoólico de, no mínimo, 99,3% em massa (°INPM) e é utilizado como aditivo na gasolina, enquanto o AEHC, com teor entre 92,6 e 93,8% em massa de etanol, pode ser utilizado diretamente em motores movidos a álcool ou carros bi-combustível (*flex-fuel*).

As obras de James Chen e Chung Chi Chou (*Cane Sugar Handbook*) e E. Hugot (*Handbook of Cane Sugar Engineering*) são referências na descrição dos processos de produção de etanol de primeira geração e açúcar, visto que essas obras descrevem as principais etapas na produção desses produtos. É interessante ressaltar que o livro de Chen e Chou aborda outros pontos além do processo, como por exemplo, algumas formas de pagamento da cana-de-açúcar utilizadas.

As arquiteturas de primeira geração deste estudo são baseadas em referências [CHEN; CHOU, 1993; HUGOT, 1986] e experiências do setor sucroalcooleiro, considerando inclusive as tecnologias que estão sendo utilizadas nas novas usinas em construção, conforme informado na tabela 1.5; ou seja, este estudo irá considerar, por exemplo, a questão de utilização de caldeiras de alta pressão (100 bar).

Uma característica deste estudo é a delimitação da área industrial como foco, visando a otimização e implantação no processo industrial. Citam-se apenas a parte agrícola e a parte administrativa das unidades de processamento de cana-de-açúcar. A otimização dessas áreas, principalmente da parte agrícola, pode ser objeto de estudos complementares a esta dissertação.

Após caracterizar as plantas atuais, serão caracterizadas as principais tecnologias de segunda geração de produção de etanol através do conceito de Biorefinaria. O livro *Biorefineries – Industrial Processes and Products – Status Quo and Future Directions* editado por Birgit Kamm, Gruber e Michael Kam é atualmente

uma das principais referências nesse assunto, pois apresenta diversos autores especialistas, o que possibilita uma visão atual das principais tecnologias emergentes e das principais previsões tecnológicas. Esse livro demonstra bem o conceito de duas plataformas para o processamento de Biomassa, a Termoquímica e a Bioquímica. É válido informar que esta dissertação analisa uma tecnologia de cada plataforma para a comparação; porém, utiliza a tecnologia *Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine* (BIG/GT) para realizar o estudo de integração e cálculo de eficiência energética.

As tecnologias aqui avaliadas ainda não estão maduras em escala industrial. Dessa forma, as principais referências são estudos de departamentos de pesquisa como o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dos Estados Unidos, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), Centro de Tecnologia Canavieira (CTC).

Além dessas referências, este estudo é baseado diretamente em publicações de artigos em revistas especializadas, publicações em seminários e workshops, principalmente nos workshops do programa de pesquisas de políticas públicas da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

A metodologia desta dissertação é baseada no conceito de engenharia de sistemas^{1.1}, tendo como principal referência o livro *Systems Engineering Handbook*, que foi publicado pela INCOSE, *Internacional Council on Systems Engineering*; e nos conceitos de balanço de massa e energia.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira: no Capítulo 2 encontra-se a descrição da metodologia que é utilizada para a realização deste trabalho. O Capítulo 3 é composto pela descrição do processo de produção de etanol de primeira geração. No Capítulo 4, são apresentadas a plataforma bioquímica e

---

^{1.1} Engenharia de Sistemas: empregada para tratar problemas envolvidos na criação de sistemas produtos / serviços de crescente complexidade. Foi desenvolvida e metodizada uma série de atividades de engenharia com expressivos progressos na área de defesa, aeroespacial, comunicações e energia [VALERIANO, 1998].

termoquímica, informando as principais tecnologias de segunda geração e é realizado uma análise comparativa entre as plataformas. No Capítulo 5, é realizado o estudo de configurações de integração de tecnologia de segunda geração em planta existente, demonstrando os ganhos energéticos e, por fim, é apresentado um estudo de caso para exemplificar o possível ganho dessa integração. No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho juntamente com sugestões de possíveis pesquisas, que poderão ser complementares a esta dissertação.

2 Metodologia

2.1 Introdução

Inicialmente, esta dissertação iria utilizar a metodologia de engenharia de sistemas para avaliar o nível de integração das tecnologias de segunda geração (Etanol Celulósico) com uma planta industrial de processamento de cana-de-açúcar de primeira geração existente (Processamento de Sacarose), conforme descrito a seguir. Porém, devido à falta de informações técnicas em artigos e em fornecedores, realiza-se uma análise sistêmica simplificada, utilizando dados de relatórios governamentais e uma análise detalhada referente à eficiência energética.

Esta dissertação considera, como sistema, a área industrial da usina de processamento de cana-de-açúcar, sendo que as condições de contorno são:

- O limite de entrada do sistema a ser considerado neste trabalho é o descarregador Hilo^{2.1} (ver figura 2.1); ou seja, esse estudo não considera a área agrícola e a área de pagamento da matéria-prima (balanças de pesagem da cana-de-açúcar e sonda amostradora^{2.2});

Figura 2-1 - Foto de um descarregador tipo Hilo [NETO, 2009].

---

^{2.1} Descarregador Hilo: equipamento utilizado para descarregar a carreta de cana-de-açúcar na mesa alimentadora, um guincho utilizado para tombar a carreta na mesa alimentadora (a carreta não é sempre tombada, mas, às vezes, a cana é retirada da carreta com correntes).

^{2.2} Sonda amostradora: equipamento utilizado para obter amostras de cana-de-açúcar da carreta com o intuito de verificar a qualidade da cana-de-açúcar por análises realizadas em laboratório.

- A unidade de processamento de cana-de-açúcar possui dois grandes resíduos: vinhaça e bagaço da cana-de-açúcar, e os principais produtos são: álcool e energia elétrica. Sendo assim, o limite de saída do sistema em análise é a bacia de vinhaça, que está localizada dentro da área industrial, a área de deposição de bagaço (figura 2.2) e as estações de carregamento de álcool;

Figura 2-2 – Foto da deposição de bagaço [NETO, 2009].

- A unidade de processamento de cana-de-açúcar existente tem apenas produção de energia elétrica e de álcool; não se considera os equipamentos de produção de açúcar;
- O aproveitamento de 50% da palha da cana-de-açúcar, visto que existe a necessidade de deixar parte da palha no campo para manter a umidade, reduzir a erosão e inibir ervas daninhas. Além disso, não se avalia o problema de recolhimento e transporte da palha para a unidade industrial;

- As atuais plantas industriais utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível para a caldeira, que gera vapor de alta pressão para a produção de energia elétrica, através de conjuntos de turbo - geradores e para atender a necessidade de vapor de processo. Este estudo considera que o bagaço da cana-de-açúcar produzido será utilizado apenas o suficiente para gerar vapor e energia elétrica necessários para a operação da usina, visando a maximização da produção de biocombustíveis e energia elétrica.

2.2 Metodologia Planejada (MP) neste trabalho

A metodologia planejada inicialmente neste trabalho é descrita a seguir, no intuito de ser uma referência para outros trabalhos, visto que a análise detalhada prevista não é possível de ser realizada, pela falta de informações consistentes relativas aos processos de 2º geração. Na maioria dos casos, essas técnicas estão em poder dos detentores de tecnologia, visto que ainda não é difundida e madura no mercado.

A figura 2.3 demonstra, de forma esquemática, a metodologia planejada de análise, que considera detalhadamente os processos das novas tecnologias e a utilização de painéis de decisão para obter as conclusões.

Figura 2-3 – Metodologia de análise deste estudo [NETO, 2009]

É importante ressaltar que mesmo a MP deste estudo realizaria uma análise funcional da integração das tecnologias propostas. Dessa forma, o foco desse tipo de análise não é a abordagem de projeto básico de engenharia, que detalha todos os equipamentos, características e impactos. Este escopo pode ser objeto de estudos posteriores e complementares a essa dissertação, quando a tecnologia estiver mais difundida e madura.

2.2.1 Elementos de Análise

Os elementos de análise descritos a seguir não são exclusivos deste texto, mas sim, elementos de um conjunto maior de propriedades atribuíveis à sistemas de engenharia [MARQUES, 2008]. Essas características foram selecionadas e desenvolvidas para o caso particular em foco deste estudo, que é a integração de tecnologias de segunda geração em unidades de processamento de cana-de-açúcar existentes.

2.2.1.1. Integrabilidade

É o nível de mudanças a ser realizado no sistema existente para atender às necessidades das novas tecnologias, avaliando a questão do espaço físico necessário, a possibilidade de realocação de equipamentos, a otimização dos fluxos de energia e, por fim, a necessidade de uma área totalmente nova para implantação dessa tecnologia. É interessante sempre tentar aproveitar a área existente, visto que a criação de novas áreas sempre é crítica, devido à necessidade de transporte das matérias processadas, aumentando o custo de implantação e o custo operacional. Porém, é inevitável a utilização de áreas adicionais em processos de integração completa.

2.2.1.2. Confiabilidade

É a probabilidade de o sistema realizar suas funções em condições normais e em situações adversas por um período de tempo pré-determinado, sendo que sempre existe a possibilidade do sistema não realizar as funções projetadas.

É interessante notar que essa característica pode possuir peso diferenciado para cada subsistema, visto que a importância do bom funcionamento comparado com outras características varia de acordo com a sua aplicação.

2.2.1.3. Disponibilidade (A)

É a qualidade da planta para executar sua função ou conjunto de funções quando solicitada. Essa propriedade pode ser formulada como:

$$A = MTBF / (MTTR + MTBF) \quad (2.1)$$

onde MTBF = tempo médio entre falhas ("*Mean Time Between Failures*") e MTTR = tempo médio de reparo ("*Mean Time to Repair*").

Essa é uma propriedade particularmente importante em sistemas que não possuam elementos de armazenamento, para amortecer e absorver possíveis problemas pontuais no sistema; ou seja, processos contínuos em série podem ter parada de toda a seqüência de funções em consequência de um problema em um equipamento. A unidade de processamento de cana-de-açúcar possui essa característica de ter processos em série.

Outra característica desse elemento é a importância da fase de projeto, já que é neste momento que são projetadas as propriedades que serão mensuradas, os critérios de redundância e a seleção de equipamentos.

Outro importante fator de disponibilidade é a capacidade de realização de diagnóstico de suas falhas e a indicação de ações corretivas, que influenciam diretamente o tempo médio de reparo, o que resulta diretamente no grau de automação envolvido no sistema.

2.2.1.4. *Manutenabilidade (M)*

Essa característica é a capacidade de uma planta ser mantida ou reconduzida a determinadas condições de operação através de ferramentas, peças e mão-de-obra qualificada. Essa propriedade pode ser formulada como:

$$M = T / (T + MTTR) \quad (2.2)$$

onde MTTR = tempo médio de reparo ("*Mean Time to Repair*") e T = tempo total analisado.

A fórmula (2.2) demonstra a importância de medir o tempo para que a planta possa novamente estar pronta para operar após alguma parada. Dessa forma, uma avaliação qualitativa de custo e prazo da entrega dos recursos é fundamental para determinar o tempo de parada da planta. Por exemplo, verificar se todos esses materiais são encontrados no Brasil.

2.2.1.5. *Sustentabilidade*

Esse elemento é a avaliação do conceito de ciclo de vida das tecnologias; ou seja, a verificação desde a extração da matéria prima, fabricação, construção, operação, manutenção e descarte, da utilização de:

- Reuso;

- Reciclagem;
- Minimização de resíduos gerados;
- Descarte de resíduos perigosos;
- Consumo de água;
- Segurança;
- Outras.

2.2.1.6. Estabilidade

A estabilidade é a capacidade de o sistema manter estáveis suas funções quando ocorrer alguma perturbação ou variação nas suas entradas. É interessante informar que existem diversas ferramentas para aumentar a estabilidade, uma delas é o grau de automação da unidade industrial.

Esse elemento de análise é um importante item na aplicação desta metodologia, já que existem diversos tipos de variações nesse setor industrial, como as variações da matéria-prima advinda da área agrícola.

2.2.1.7. Maturidade Comercial e Tecnológica

A maturidade comercial e tecnológica pode ser identificada através do histórico de experimentos, artigos publicados, plantas experimentais, plantas de demonstração comercial e plantas industriais. Além disso, uma característica de tecnologias emergentes é o custo unitário da capacidade instalada, que é decrescente com o avanço da implantação dessa tecnologia.

É interessante observar que o avanço da maturidade da tecnologia resulta em melhores dados para as demais características desta metodologia, já que existe uma maior difusão do conhecimento referente aos processos.

2.2.1.8. Derivabilidade

A derivabilidade é a capacidade de atribuir alternativas da função principal projetada; ou seja, a possibilidade de agregar valor à tecnologia, através de desenvolvimentos complementares.

A derivabilidade pode ser interna ou externa. A interna utiliza conhecimento adquirido da tecnologia para desenvolver novas funções e a externa agrega conhecimento de outras tecnologias para implementar novas funções na tecnologia de estudo.

É interessante essa avaliação nas tecnologias de 2ª geração, pois existem diversos estudos para se obter outros produtos da biomassa, utilizando o conceito de biorefinaria [KAMM B., GRUBER, KAMM M., 2006], que poderão substituir produtos de petróleo. Um exemplo disso é a obtenção de biopolímeros através de fontes renováveis.

2.2.1.9. Escalabilidade

A escalabilidade é a propriedade de um sistema poder ter seus limites físicos ampliados de forma a obter correspondente aumento de capacidade, sem perda significativa de suas demais características.

A escalabilidade também está associada ao aspecto econômico; nem sempre o aumento de escala física está associado a uma redução do custo unitário da capacidade disponibilizada.

Essa é uma propriedade importante para o setor sucro-alcooleiro, pois esse setor tem a característica de realizar ampliações do projeto inicial, devido às questões de aumento de área cultivada e do ciclo da matéria-prima.

2.2.1.10. Modularidade

A modularidade é a propriedade de subdividir o sistema em pequenos módulos, que podem ser criados independentemente e usados para diversas aplicações; porém, são agrupados através de um critério de interface bem definido. Isso possibilita uma facilidade na expansão e flexibilidade de novas soluções.

Esse recurso é também conhecido como filosofia “caixa-preta”, que é um importante instrumento para realização de estudos de alternativas de fornecimento, visando à otimização de custo e condições gerais de fornecimento.

2.2.1.11. Construtabilidade

Construtabilidade é a propriedade de utilização do conhecimento da construção para prever e planejar a construção da tecnologia, verificando toda a seqüência de montagem e acessos necessários. Essa propriedade informa os principais requisitos necessários para a montagem dos equipamentos.

2.2.1.12. Eficiência Energética

Eficiência energética é a relação da energia consumida com a energia produzida. É válido informar que este estudo é realizado através do conceito sistêmico (caixa preta); ou seja, são avaliadas as entradas e saídas para realizar o cálculo energético do sistema.

2.2.1.13. Viabilidade Econômica

A questão de viabilidade econômica deve ser avaliada para verificar se a tecnologia é sustentável, visto que ela tem que ser economicamente viável para conseguir recursos para ser implementada em novos investimentos, já que quanto maior o capital investido maior será o risco.

2.2.2 Painel de Decisão

2.2.2.1. Painel de decisão de Subsistema

O painel de decisão demonstra a probabilidade de êxito da integração da tecnologia de segunda geração no subsistema da unidade de processamento de cana-de-açúcar existente.

O painel de decisão de subsistema é constituído pelos elementos apresentados no item 2.2.1. Além disso, utiliza representação numérica para operacionalizar a obtenção do resultado. Essa representação é construída através de atribuição de pesos para cada elemento e valores numéricos para cada tecnologia. A soma ponderada informa qual a tecnologia mais integrável.

Os pesos estão de acordo com a importância do elemento na análise e podem ser distribuídos de 1 a 3, sendo 3 a característica muito relevante, 2 a característica relevante e 1 pouco relevante.

Os valores numéricos atribuídos às tecnologias são de 1 a 3, onde 1 é baixa probabilidade de atender a função daquele elemento, 2 é a probabilidade moderada e 3 é ter alta probabilidade.

Tabela 2-1 - Exemplo de painel decisório - subsistema

Avaliação Subsistema – Exemplo			
ELEMENTO	PESO	Plataforma Bioquímica	Plataforma Termoquímica
Integrabilidade			
Confiabilidade			
Disponibilidade			
Manutenabilidade			
Sustentabilidade			
Estabilidade			
Maturidade Comercial e Tecnológica			
Derivabilidade			
Escalabilidade			
Modularidade			
Construtabilidade			
Eficiência Energética			
Custo			
TOTAL			

Fonte: [NETO, 2009].

Os painéis de decisão utilizariam como base a tabela 2.1, através de referências como publicações e congressos.

2.2.2.2. Painel de decisão de um sistema

O painel de decisão de um sistema utiliza a mesma estrutura do painel de decisão de subsistemas, empregando a representação numérica com pesos e valores. Porém, ao invés de avaliar os elementos de análise, este painel avalia os subsistemas, resultando no painel decisório de um sistema.

A tecnologia que possuir maior pontuação é considerada com maior possibilidade de integração em uma unidade industrial.

Tabela 2-2 - Exemplo de painel decisório - sistema

Avaliação SISTEMA – Exemplo			
SUBSISTEMA	PESO	Plataforma Bioquímica	Plataforma Termoquímica
SUBSISTEMA 1			
SUBSISTEMA 2			
...			
SUBSISTEMA N			
TOTAL			

Fonte: [NETO, 2009]

Após a verificação da tecnologia mais integrável, esta dissertação iria realizar um estudo de caso em uma usina existente, com o intuito de exemplificar as análises realizadas.

2.3 Metodologia Realizada (MR) neste trabalho

A metodologia apresentada foi revisada devido à falta de informações consistentes para realização da mesma, sendo este trabalho baseado na metodologia 5E, (E1 – *technology evaluation*, E2 – *energy efficiency*, E3 – *environmental impacts*, E4 – *economic viability*, E5 – *social-political and human resource effectiveness*) utilizada pelo governo da Califórnia para realizar uma avaliação de tecnologias de 2ª geração de obtenção de biocombustível e energia elétrica. No capítulo 4, são demonstradas essas tecnologias e uma análise comparativa entre elas.

2.3.1 E1 – Avaliação da tecnologia

A avaliação da tecnologia é similar ao item 2.2.1.7, maturidade tecnológica; porém, a análise realizada se refere ao progresso da tecnologia. Considerou-se: pesquisa, desenvolvimento, demonstração e planta comercial.

A pesquisa é realizada em laboratório em escalas reduzidas, validando os conceitos físicos e químicos através de experiências ou modelos matemáticos. O desenvolvimento é a fase que implementa uma planta piloto com escala reduzida,

até 10 toneladas/dia. A planta de demonstração considera uma capacidade de 20 a 25 toneladas/dia e fornece subsídios para desenvolver as especificações de uma planta comercial, além de validar os principais controles e equipamentos. A planta comercial é a exemplificação e teste final desses processos.

Outro passo é a difusão da tecnologia, visto que isso traz a redução do custo e a difusão do conhecimento das técnicas. Nesta dissertação, não foram obtidas informações consistentes para determinar o estágio das tecnologias, porque não há acesso aos dados dos processos desenvolvidos pelos fornecedores.

2.3.2 E2 – Eficiência energética

A eficiência energética, descrita no item 2.2.1.12, é a relação da energia obtida pela energia de entrada. Essa metodologia foi um dos objetivos desta dissertação, já que realiza a análise de eficiência energética de diversas configurações, informando os principais cenários para estudos de viabilidade.

O capítulo 5 realiza os cálculos de eficiência energética referente as unidades de processamento de cana-de-açúcar existentes, considerando a integração parcial e total das novas tecnologias, conforme demonstrado no apêndice I deste documento. Após, é utilizado um estudo de caso para exemplificar essa integração, levantando algumas observações e questionamentos, que poderão ser temas para trabalhos futuros. É válido ressaltar que no estudo de caso são avaliadas algumas das características da metodologia planejada, de forma preliminar.

2.3.3 E3 – Impactos ambientais

Os impactos ambientais são avaliados pelos índices de emissão, consumo de água, resíduos sólidos, entre outras avaliações. Nesta dissertação, apenas o capítulo 4 aborda esse item, visto que não é foco deste estudo.

2.3.4 E4 – Viabilidade econômica

A viabilidade econômica é um importante recurso, sendo idêntico ao item 2.2.1.13. Uma questão a ser observada é que quanto mais difundida a tecnologia, menor será o seu custo. Uma análise de viabilidade econômica de ampliações em unidades de processamento de cana-de-açúcar deve levar em conta o alto custo da

implantação agrícola, bem como o custo operacional associado. No capítulo 5 é realizada uma análise simplificada dessa questão.

2.3.5 E5 – Efeito sócio-político

Essa avaliação não foi realizada nesta dissertação. Porém, um efeito sócio-político da implantação de tecnologias de segunda geração é a necessidade de mão-de-obra mais qualificada para operar a planta com segurança, visto que as condições de trabalho tornam-se mais críticas, devido à utilização de processos com altas pressões e temperaturas.

3 Processos de uma planta industrial atual

Este capítulo tem como objetivo demonstrar os principais processos de uma unidade industrial de processamento de cana-de-açúcar para produção de AEHC e AEAC, bem como os principais equipamentos relacionados em cada processo. As condições de contorno desse sistema estão informadas no capítulo 2 deste estudo.

É importante mencionar que este capítulo é baseado em livros [CHEN; CHOU, 1993; HUGOT, 1986], e ainda pelo conhecimento adquirido nas visitas em usinas de processamento de cana-de-açúcar.

A figura 3.1 demonstra os principais processos da produção de álcool, energia elétrica e vapor que estão detalhados neste estudo. As áreas de utilidades não estão sendo consideradas nesta figura, visto que elas atuam em praticamente todos os processos.

Figura 3-1 – Principais áreas de processo de uma unidade de processamento de cana-de-açúcar atual [NETO, 2009]

3.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é a matéria-prima para a unidade de processamento deste estudo. Ela pertence ao gênero *Saccharum*, sendo que a cana-de-açúcar cultivada é um híbrido multiespecífico de espécies do gênero e recebe a designação *Saccharum* spp. [ALMEIDA; ROCHELLE; CROCOMO, 1995].

A composição básica da cana-de-açúcar é apresentada na tabela 3.1 e a representação da energia contida nesta matéria-prima pode ser verificada na tabela 3.2.

Tabela 3-1 - Composição básica da cana-de-açúcar

Componente	Teor (% massa)
Sólidos totais	24 a 27
Sólidos solúveis	10 a 16
Fibras (base seca)	11 a 16
Água	73 a 76

Fonte: [MATELATTO, 2005]

Tabela 3-2 - Energia contida na cana-de-açúcar atual

	Cana-de-açúcar
Produção (t / ha.ano)	70
Fibras % cana	14,0
Palha % cana	14,0
POL % cana	14,5
Total de Fibras (t /ha.ano)	19,3
Energia Primária (GJ/ ha.ano)	520

Fonte: [LEAL, 2006].

É interessante notar que é preciso existir uma área de plantação de cana-de-açúcar próxima à usina e com dimensões adequadas para viabilidade econômica do seu processamento.

3.2 Recepção da cana-de-açúcar

O processo de recepção da cana-de-açúcar dentro do conceito de sistema é iniciado no tombador de cana, chamado de descarregador Hilo, que foi explanado no capítulo 2. Após tombar a cana-de-açúcar na mesa alimentadora (figura 3.2), esta

passa pelo sistema de limpeza e depois é encaminhada para o sistema de preparação e extração de caldo.

Outra importante função desse subsistema é a questão de limpeza da matéria-prima, pois a mesma chega à usina contendo terra e outras impurezas, que podem prejudicar o processo de produção através da proliferação de microorganismos e desgaste de equipamentos. A limpeza da cana-de-açúcar nesta etapa pode ser realizada através de água, denominada de limpeza úmida, ou com ar, denominada de limpeza a seco.

A limpeza úmida consiste na utilização de água para remover certa quantidade de terra e impurezas vegetais (palha) da cana. Após a lavagem, essa água passa por um processo de decantação dos sólidos para ser reutilizada no processo; ou seja, é um sistema que utiliza a água em circuito fechado. Os problemas em utilizar água são: a perda considerável de açúcares (até 2% dos açúcares da cana) e o consumo de água necessário.

A limpeza a seco consiste em ventiladores que promovem a separação das impurezas, reduzindo os problemas de perda de açúcares. Esse sistema está sendo preferido nas plantas que estão sendo construídas, pois existe ganho de açúcares e economia no consumo de água. Entretanto, atualmente, a maioria da base instalada utiliza o sistema de limpeza úmida, o qual tende a desaparecer com o avanço da colheita mecanizada, já que este tipo de limpeza não é aplicável para cana picada.

Figura 3-2 – Foto do descarregador e mesa alimentadora [SERMATEC, 2008].

3.3 Preparo da cana-de-açúcar e extração do caldo

A cana^{3.1}, após ter sido limpa, passa pelo picador que possui a função de cortá-la em pedaços menores, facilitando a próxima etapa. O próximo passo é realizar a abertura das células da cana para facilitar a extração de açúcares na etapa seguinte. O equipamento utilizado para a realização dessa atividade é o desfibrador, que é constituído por uma série de martelos giratórios, que promovem o esmagamento da cana.

A cana picada e desfibrada está pronta para entrar no processo de extração; porém, para evitar a entrada no processo de algum item metálico, que pode trazer problemas para as moendas, existe um separador magnético que tem a função de retirar itens metálicos, que não fazem parte do processo e que podem ser advindos da quebra de alguma peça do picador/desfibrador e da área agrícola.

O controle do fluxo de cana para o processo de extração é realizado através do controle de velocidade das esteiras, já que estas são as responsáveis pelo transporte da cana na área de recepção e preparo, sendo utilizado o nível de cana na calha Donnelly (utilização de moenda) ou nível do colchão de cana (utilização de difusor) como a variável a ser controlada.

A extração dos açúcares da cana-de-açúcar pode ser realizada por dois meios: o sistema de moagem (figura 3.4) e o sistema de difusão (figura 3.5). O sistema de moagem consiste na utilização de um conjunto de moendas contendo de 4 a 7 ternos cada, geralmente, utiliza-se 6 ternos. Cada terno possui 4 rolos: pressão, entrada, saída e superior. É interessante a utilização de duas moendas para evitar interrupções na produção devido às suas paradas. As moendas podem ser acionadas por turbinas a vapor ou eletrificadas. Atualmente, elas são eletrificadas para economizar energia, pois esse processo é mais eficiente do que a utilização de turbina a vapor.

Nas moendas, a cana desfibrada passa entre os rolos e é comprimida a pressões elevadas, o que promove a liberação do caldo de dentro de suas células. No sexto

---

^{3.1} Cana : A cana pode ser colhida de forma manual e mecanizada. A forma mecanizada é utilizada em áreas planas e entrega a cana-de-açúcar já picada.

terno das moendas há utilização de água de embebição, utilizada para aumentar a extração dos açúcares contidos na cana. O caldo obtido no sexto terno serve como embebição do bagaço obtido no quinto terno, e assim respectivamente até o segundo terno (no primeiro terno não há necessidade de embebição), constituindo o sistema de embebição composta. A água utilizada na embebição é proveniente do condensado dos pré-evaporadores e sua temperatura é da ordem de 50°C. No último terno de moendas são obtidos o caldo cru e o bagaço.

O sistema de difusão é composto do difusor e de um a dois ternos de moendas e utiliza o sistema de lixiviação para obtenção dos açúcares, da mesma forma que as moendas. O processo de difusão é realizado através do transporte do colchão de cana dentro do difusor e da retirada do caldo em contracorrente com água a elevadas temperaturas (75 à 95°C), que é bombeada utilizando-se bombas centrífugas. Porém, o bagaço da cana sai do difusor com umidade de 80%, sendo necessária a utilização de terno de secagem do bagaço para que se obtenha grau de umidade em torno de 50% e recuperação de açúcares carregados.

A comparação entre os dois sistemas de extração demonstra que o sistema de difusão possui as vantagens de obtenção de maior grau de extração, menor consumo de potência, menores índices de infecção e menor desgaste, porém como desvantagem, necessita de um melhor processo de preparação da cana do que o sistema de moagem.

Essa área processual pode ser resumida conforme figura 3.3, tendo como matéria-prima a cana-de-açúcar limpa e dois produtos como resultados: o caldo e o bagaço. O caldo é tratado e utilizado na fermentação e o bagaço é a matéria-prima para produção de vapor, que é utilizado no processo e para produção de energia elétrica, conforme demonstrado na figura 3.1.

Figura 3-3 – Resumo do sistema de preparação da cana e sistema de extração de caldo [NETO, 2009].

Figura 3-4 – Foto de uma moenda

Figura 3-5 – Foto - Difusor [SERMATEC, 2008].

3.4 Tratamento de Caldo

O tratamento de caldo é o processo que garante condições adequadas para o bom andamento do processo fermentativo; ou seja, um caldo com menor quantidade de impurezas e contaminantes possíveis, com a concentração adequada para evitar a inibição de leveduras e com o menor consumo de energia possível.

Inicialmente, o caldo cru passa pelo o tratamento físico, que tem por objetivo remover as partículas em suspensão, principalmente areia e bagacilho^{3.2}. Os principais equipamentos que podem ser utilizados são peneiras e hidrociclones, que promovem a eliminação de impurezas grosseiras. Muitas unidades de processamento de cana-de-açúcar não possuem esse tratamento, o que resulta em problemas no processo fermentativo e sobrecarga dos decantadores e filtros.

Após o tratamento físico, é necessária a realização do tratamento químico, que tem as funções de retirar totalmente as impurezas insolúveis, retirar a maioria das impurezas colodais e neutralizar o caldo, sendo que a última função é necessária para evitar a inversão e decomposição da sacarose.

O tratamento químico é realizado através da adição da cal, CaO , na forma de leite de cal, Ca(OH)_2 , promovendo a neutralização dos ácidos orgânicos e fosfatos presentes no caldo, formando um precipitado após o aquecimento, que contém

---

^{3.2} Bagacilho: Fragmentos de cana ou bagaço resultantes do processo de preparo e extração de caldo.

sais insolúveis de cálcio. O principal precipitado é o fosfato de cálcio, que arrasta também matéria coloidal e em suspensão.

É interessante ressaltar que algumas unidades utilizam também o ácido fosfórico para corrigir a concentração de fosfato no caldo; porém, para produção de álcool não é essencial, mas pode diminuir a taxa de conversão na fermentação.

Após os tratamentos citados, o caldo é aquecido a temperaturas acima de 100°C através de aquecedores, em seguida passa por um balão de *flash* para remover os gases incondensáveis, que prejudicam o processo de decantação. Esse caldo então é enviado para o decantador, onde é adicionado polímero floculante com o objetivo de conglomerar as partículas, resultando na formação do lodo, composto das impurezas conglomeradas pelo processo de injeção de leite de cal e floculante, e caldo clarificado.

O caldo clarificado é enviado para o setor de concentração do caldo, para que seja concentrado e esterilizado, antes de ser enviado para o processo de fermentação. A concentração do caldo é realizada pela utilização de evaporadores^{3.3}, que podem ser do tipo Roberts e Multi-Reboiler, conseguindo chegar ao grau Brix^{3.4} necessário para a fermentação, 19 a 22; porém, é usual utilizar parte do caldo para produzir o xarope, 65°Brix, utilizando esse produto para a partida da planta e a correção do grau Brix na entrada do processo fermentativo. Outro processo utilizado em algumas usinas é a realização da esterilização do caldo concentrado, através de tratamento térmico para reduzir a contaminação nos processos fermentativos.

O lodo advindo do processo de decantação possui açúcares que necessitam ser recuperados. Dessa forma, ele é inserido em filtros rotativos juntamente com água para recuperação desses açúcares, resultando em caldo filtrado, que retorna para o processo, e em torta, que é utilizada como fertilizante.

A figura 3.6 é uma forma esquemática de representar o tratamento de caldo, identificando suas principais funções e equipamentos envolvidos e a figura 3.7 e 3.8 são fotos deste sistema.

---

^{3.3} Evaporadores: Equipamentos utilizados na indústria para remover água da matéria-prima, que no caso deste estudo é o caldo, resultando em um aumento de concentração.

^{3.4} ° Brix: Unidade de medida de concentração de sólidos dissolvidos em um líquido.

Figura 3-6 – Resumo do sistema de tratamento de caldo [NETO, 2009].

Figura 3-7 – Foto de um conjunto de evaporadores [NETO, 2009].

Figura 3-8 – Foto de um decantador comum tanque de *flash* [NETO, 2009].

3.5 Fermentação

O caldo resultante do tratamento do caldo é resfriado e enviado para a área da fermentação, onde é depositado em dornas (grandes tanques) para que seja realizado o processo de fermentação.

O processo de fermentação alcoólica consiste em uma série de reações químicas catalisadas pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, que ocorre em condições anaeróbicas. A seqüência de reações pode ser resumida como:

O reagente do processo fermentativo é o mosto, que é composto por um caldo de cana tratado, com concentração ideal para o bom desempenho do processo fermentativo, controlada através da adição de xarope e/ou água. O principal componente do mosto é a sacarose, que é convertida em glicose e frutose:

O etanol é produzido a partir da conversão de glicose, conforme a equação:

O rendimento estequiométrico da reação é de 0,511 g etanol/g glicose, possuindo um rendimento na fermentação alcoólica industrial em média de 90%.

O processo industrial de fermentação é executado de duas maneiras: a fermentação por batelada e a fermentação contínua. A figura 3.9 resume os equipamentos desse processo. Este estudo irá detalhar cada uma dessas formas.

Figura 3-9 – Resumo do sistema de fermentação [NETO, 2009].

3.5.1 Fermentação Batelada

O processo de fermentação por batelada com reciclo de células, ou processo Melle-Boinot, é o principal tipo de fermentação utilizado atualmente nas usinas, sendo empregado por cerca de 85% das usinas filiadas ao CTC.

O processo é realizado através do preenchimento das dornas de fermentação de mosto e fermento, além dos produtos químicos necessários para manter estável a fermentação, a saber: anti-espumante e dispersante. O tempo de enchimento demora entre 2 a 5 horas em média e o tempo total de fermentação é de 10 a 15 horas para que se possa retirar o vinho levedurado, resultado da fermentação, que é encaminhado para as centrífugas.

O vinho levedurado possui teor alcoólico dependente da concentração de mosto (quantidade de açúcar a ser fermentada) e do rendimento da fermentação, que está diretamente relacionado com o controle da injeção de mosto e do controle de temperatura da fermentação: quanto menor a temperatura maior o grau alcoólico. Atualmente, as usinas utilizam o processo fermentativo entre 25°C a 33°C para obter bom teor alcoólico com um tempo de fermentação viável; entretanto, já existem usinas testando temperaturas mais baixas.

A corrente rica em levedo é direcionada para os pré-fermentadores (pé de cuba), para que ocorra o tratamento dos levedos através da adição da água e ácido sulfúrico, que, no final, retorna para o processo de fermentação. O vinho delevedurado é a matéria-prima para os processos de destilação.

É interessante notar que as plantas industriais que utilizam esse processo de batelada podem gerenciar o número de dornas e tempo de fermentação, para que o sistema trabalhe de modo contínuo.

3.5.2 Fermentação Contínua

O processo de fermentação contínua ocorre através da adição e retirada de forma contínua e constante do reator, mantendo-se assim o volume reacional constante.

O processo de fermentação contínua utilizado na indústria consiste em cerca de 3 a 5 reatores de mistura ligados em série com reciclo de células (figura 3.10).

O primeiro reator da série recebe o mosto, proveniente da unidade de tratamento de caldo, e a levedura, proveniente da seção de tratamento do fermento, que, por sua vez, recebeu a levedura utilizada nos reatores após passagem pelas centrífugas. Cada reator possui um sistema de resfriamento (trocador de calor a placas) independente, de modo a manter a temperatura da reação em níveis adequados (28 a 35°C), já que a reação de conversão de glicose a álcool etílico é exotérmica.

A alimentação do segundo reator é constituída pelo produto da primeira, que já possui certa quantidade de etanol, além de levedura, água e açúcares. Cada reator recebe como alimentação o produto do reator anterior. O produto do quarto reator é chamado de vinho levedurado, que é uma solução diluída de etanol que contém água, etanol, células de levedura, açúcares não consumidos e outros produtos formados no decorrer da reação de fermentação.

O vinho levedurado vai para as centrífugas para recuperação da levedura, sendo obtidos dois produtos: vinho delevedurado, que é purificado nas unidades de destilação e desidratação, e o creme de levedura, que é composto por uma solução concentrada de células de levedura e é encaminhado à seção de tratamento de fermento.

No caso da fermentação alcoólica, que é um processo que apresenta a velocidade de desenvolvimento do microorganismo como uma função da concentração do substrato e, portanto, do tempo da reação, é mais vantajoso trabalhar com reatores de mistura em série do que com um único reator. O sistema com múltiplos estágios apresenta facilidades operacionais como esgotamento total do mosto, possibilidade de alcance de elevados teores alcoólicos sem intoxicação da levedura e maior estabilidade do processo, já que a levedura só sofre inibição pelo produto nos últimos estágios, que são os que apresentam maiores concentrações de etanol.

3.5.3 Comparação entre a fermentação contínua e batelada

Realizando uma análise comparativa entre os dois processos, o contínuo tem as seguintes vantagens em relação ao de batelada: equipamentos menores, tempo de uso otimizado, elevado rendimento médio, obtenção de vinho uniforme, maior facilidade de uso de controle avançado. As desvantagens são: maior possibilidade de infecção, possibilidade de mutantes menos produtivos, dificuldade de operação em estado não estacionário [SCHMIDELL, 2001]. Apesar das desvantagens, a fermentação contínua parece ser a melhor opção para as destilarias de grande porte, oferecendo vantagens em termos de custo instalado, custos referentes à mão de obra, energia envolvida no processo e vantagens relacionadas ao controle operacional, instrumentação e automação.

Figura 3-10 – Foto de uma fermentação contínua

3.6 Processos de Separação

Os processos de separação utilizados nas unidades de processamento de cana-de-açúcar empregam a destilação para a produção de álcool hidratado (AEHC), teor alcoólico 92,6 a 93,8% em massa, e o processo de desidratação para a produção de álcool anidro (AEAC), teor alcoólico de no mínimo 99,3% em massa de etanol. A matéria-prima desse processo é o vinho delevedurado, que possui teor alcoólico entre 8 a 12%, dependendo do rendimento da fermentação.

3.6.1 Destilação

A mistura etanol-água é uma mistura não ideal, já que os seus componentes formam um azeótropo^{3.5}. Dessa forma, a destilação alcoólica realiza a concentração da mistura até os pontos próximos do azeótropo. A configuração mais freqüente desse processo nas usinas brasileiras é a utilização de 5 colunas: A, A1, D, B e B1. A figura 3.11 demonstra o fluxograma dessa configuração.

Figura 3-11 – Fluxograma esquemático do processo de destilação do tipo ABB1 [MEIRELLES, 2006]

^{3.5} Azeótropo: solução de dois ou mais componentes que, sob pressão constante, tem uma temperatura de vaporização isotérmica perfeitamente determinada.

A coluna A é conhecida como coluna de esgotamento do vinho, A1 de epuração do vinho, a D de concentração de álcool de segunda. Esse grupo de coluna é conhecido como conjunto de destilação. Já a coluna B, utilizada para enriquecimento e retificação da flegma, e a coluna B1, de esgotamento, são conhecidas como colunas de retificação.

A coluna A1 tem a função de purificar o vinho de substâncias de maior volatilidade e dos gases contaminantes, completar o aquecimento e, geralmente, é constituída de 4 pratos. O vinho é alimentado no topo da coluna A1 e a flegma, teor alcoólico de aproximadamente 40% em massa, é retirada no topo da coluna A (fundo da coluna A1), que geralmente possui entre 16 a 24 pratos e é enviada para a coluna B. A coluna D, instalada sobre a coluna A1, tem a função de concentrar os produtos mais voláteis do vinho e possui, geralmente, 6 pratos. O vapor obtido no topo da coluna D é condensado no trocador de calor R e no condensador auxiliar R1, sendo o fluxo dividido em duas partes: uma volta para a coluna de reciclo e a outra é retirada como álcool de segunda. No fundo da coluna A, é retirada a vinhaça, que é utilizada geralmente como fertilizante através de fertirrigação no canavial; entretanto, existem diversos estudos para um melhor aproveitamento da vinhaça em outras aplicações.

A coluna B é alimentada pelo flegma produzido na coluna A1, sendo que no topo desta coluna o vapor obtido é quase todo condensado nos trocadores de calor (E, E1 e E2) e o álcool hidratado é retirado em uma saída lateral, quase no topo da coluna B, onde é resfriado no trocador J. A coluna B possui cerca de 40 pratos e está localizada sobre a coluna B1, que possui 13. É interessante notar que o vapor extraído do topo da coluna B é utilizado para pré-aquecimento do vinho, que é, posteriormente, aquecido no trocador K, resfriando a vinhaça. No fundo da coluna B1, é obtido a flegmaça, que deve conter teor alcoólico da ordem de 0,02% em massa.

O vapor utilizado na destilaria é fornecido no fundo da coluna A e B, podendo ser por contato direto (via injeção de borbotagem) ou indireto (trocadores de calor). É possível utilizar o vapor vegetal obtido no sistema de evaporação no tratamento de caldo, ou o vapor de escape obtido na saída das turbinas de contrapressão.

3.6.2 Desidratação

No Brasil, os principais métodos de desidratação no setor canavieiro são: destilação azeotrópica com ciclohexano, destilação extrativa com monoetilenoglicol (MEG) e adsorção em peneiras moleculares.

3.6.2.1. *Destilação Azeotrópica com ciclo hexano*

O processo de destilação azeotrópica com ciclo hexano é a forma mais utilizada nas usinas existentes no Brasil. Inicialmente, esse processo era realizado com benzeno, porém, com a sua proibição em 1997, devido ao seu potencial cancerígeno, as usinas que tinham a infra-estrutura instalada aproveitaram as instalações com o ciclo hexano. É importante destacar que esse processo necessita de um alto consumo de vapor por litro de álcool [MEIRELLES, 2006].

Este processo consiste na formação de uma nova mistura azeotrópica heterogênea com água ou etanol, através da adição de um novo componente. O novo azeótropo formado é retirado no topo ou no fundo da coluna, enquanto um dos componentes da mistura original é obtido puro na outra extremidade da coluna, sendo necessária a utilização de mais uma coluna [BRITO, 1997].

A "4ª técnica das usinas de Méle" é uma otimização deste processo, pois ela utiliza a coluna B para injeção do ciclo hexano reduzindo à terça parte o consumo de vapor. Entretanto, a usina perde a flexibilidade de produzir álcool hidratado e anidro, uma vez que, neste processo, a usina só poderá produzir anidro.

3.6.2.2. *Destilação Extrativa*

A destilação extrativa consiste na adição de um solvente, glicerina ou (MEG) à mistura azeotrópica inicial, para que ocorra uma alteração na volatilidade relativa dos componentes da mistura e, conseqüentemente, o equilíbrio líquido-vapor dos componentes originais. A recuperação do solvente é realizada pela adição de uma nova coluna.

O solvente utilizado neste processo deve possuir ponto de ebulição superior à mistura etanol-água, pois a adição no topo da coluna arrasta a água, obtendo no topo da coluna o etanol, sendo assim necessária outra coluna de destilação

tradicional para separar o solvente (extraído no fundo da coluna) e a água (topo da coluna).

No Brasil, ainda não existe uma grande quantidade de usinas utilizando essa tecnologia, porém, as novas implantações estão aderindo a essa metodologia devido ao seu baixo consumo de vapor e utilizando como solvente o MEG.

3.6.2.3. *Adsorção em Peneiras Moleculares*

Este processo consiste na adsorção da água contida no álcool hidratado através da utilização de um leito de zeólitos, que consistem em estruturas tridimensionais de alumínio e silício com elevados graus de ordenação no nível microscópico e superficial. O diâmetro dos zeólitos empregados no processo é de 3 Å, com objetivo de adsorver as moléculas de água que têm diâmetro da ordem de 2,8 Å, separando-a do etanol, de diâmetro de 4,4 Å.

No processo industrial, o álcool hidratado é vaporizado, utilizando-se vapor de aproximadamente 6 bar g de pressão, e enviado para as peneiras moleculares que contêm os zeólitos. Geralmente são constituídos de três leitos, sendo que um está sempre em regeneração (retirada da água acumulada no leito através da aplicação de vácuo). A água obtida é uma mistura hidro-alcoólica que é encaminhada para a unidade de destilação convencional. A figura 3.12 é um fluxograma deste processo.

Essa é uma tecnologia que vem sendo bem aplicada nos novos projetos, pois possui baixo consumo de vapor; porém, o seu inconveniente é que os zeólitos não são produzidos no Brasil [MEIRELLES, 2006].

Figura 3-12 – Fluxograma esquemático do processo de desidratação por peneira molecular [MEIRELLES, 2006].

3.7 Processo de Produção de Vapor e Energia

O bagaço, produto resultante do processo de extração de açúcares, é a matéria-prima para a produção de vapor, e, conseqüentemente, a produção de energia. O bagaço, até o ano de 2000, era considerado pela maioria das usinas como resíduo e não como matéria-prima, pois as usinas produziam energia elétrica apenas para seu consumo interno, quase não havia geração de excedente, utilizando caldeiras de vapor de baixa eficiência para não sobrar bagaço.

Após o início da geração de excedentes, houve uma alteração no aproveitamento do bagaço, já que as usinas começaram a trocar as caldeiras de pressão de 21 bar, que atendiam as necessidades de aquecimento e energia elétrica para consumo próprio, para caldeiras de maior pressão e temperatura. Atualmente, os novos empreendimentos estão indo para patamares de pressão de 100 bar e 530°C para obter um melhor aproveitamento do bagaço. A figura 3.13 demonstra o esquema de aproveitamento do bagaço. É interessante notar que as novas unidades de processamento de cana-de-açúcar são produtoras de álcool e energia elétrica.

Figura 3-13 – Esquema de produção de vapor e energia elétrica (bar = bar g) [NETO, 2009].

É interessante notar que o bagaço da cana será matéria-prima valorizada, pois ele é o principal componente a ser utilizado nas tecnologias de segunda geração.

3.8 Tancagem e Estações de Carregamento de Álcool

Este é o sistema de exportação e armazenamento de álcool (figura 3.14), necessário para escoamento da produção deste produto. Atualmente, as usinas possuem tanques de armazenamento e estações de carregamento de carretas de álcool.

Com o crescimento do número de unidades instaladas e com o possível aumento de produção, surgem estudos de viabilidade de implantação de alcodutos, que irão possibilitar um melhor escoamento da produção, principalmente no sentido de exportação.

É interessante notar que está sendo alterada a questão de medição da produção e carregamento de álcool, pois com o avanço da produção, os órgãos de regulamentação e os produtores estão começando a utilizar sistemas de medição de produção e exportação com precisão similar à existente na área de transferência de custódia de petróleo.

Este estudo não irá considerar a alteração nesse sistema, pois existe a necessidade de estudo logístico de exportação da produção e tempo de residência

em tanques para verificar a real necessidade de ampliações. Os estudos logísticos de exportação de produção são complementares a esta dissertação.

Figura 3-14 – Foto de um sistema de tancagem [NETO, 2009].

3.9 Utilidades

As utilidades implantadas em unidades de processamento de cana-de-açúcar são basicamente:

- Ar comprimido – Sistema fornecedor de ar comprimido para a planta. Houve um aumento no consumo devido ao aumento de operação remota da planta e do número de válvulas com acionamento pneumático;
- Água desmineralizada – Sistema de água desmineralizada necessária para a realização de complemento da água de caldeira;
- Água Tratada/ Efluentes – Sistema de captação de água e tratamento de água e efluentes. Sistema importante devido à necessidade de otimização do uso da água;

- Sistema de Incêndio – Sistema necessário para contenção de incêndio e para licença de operação da unidade industrial.

Este estudo considera a integração de novas tecnologias em unidades existentes, dessa forma esta dissertação considera que as utilidades implantadas sejam suficientes para atender a implantação da nova tecnologia.

4 Processos de 2ª geração

4.1 Introdução

Este capítulo tem como principal objetivo demonstrar as principais tecnologias de segunda geração, aproveitamento de celulose em escala industrial, dividindo em duas classes principais: plataformas bioquímicas e termoquímicas. Além disso, realiza-se a análise qualitativa das tecnologias, conforme descrito no capítulo 2, por meio de consultas a relatórios governamentais, tais como NREL e *Califórnia Energy Commission* (CEC), visto que as tecnologias estão em processo de desenvolvimento e suas informações são restritas aos fornecedores que as estão desenvolvendo.

A Plataforma Bioquímica constitui-se das tecnologias que realizam a conversão da Biomassa (Hemicelulose e Celulose) em açúcares, pentoses e hexoses, através de processos químicos e enzimas, que possibilitam a realização da fermentação de modo similar ao do processo de 1ª geração, obtendo-se biocombustível, sendo o foco deste trabalho o etanol [KAMM B.; GRUBER; KAMM M., 2006].

A Plataforma Termoquímica constitui-se das tecnologias que utilizam a energia térmica para realizar a obtenção de gás de síntese, o qual pode ser catalisado para energia elétrica, metanol, diesel entre outros produtos.

A figura 4.1 demonstra, de forma resumida, as plataformas de conversão, que introduz o conceito de Biorefinaria. Entretanto, este trabalho se concentrará na produção de etanol e/ou energia elétrica de biomassa, não mencionando detalhes sobre produtos químicos que podem ser obtidos por meio desses processos.

Figura 4-1 – Definição de Plataformas Bioquímica/Termoquímica [NREL, 2008].

Algumas características dessas plataformas auxiliam uma analogia com as tecnologias atuais; dentre elas, tem-se:

- A eficiência energética do processo termoquímico para geração de energia elétrica utilizando turbina a gás está em outro patamar, quando comparada com a conversão a combustão, tecnologia atual, visto que o processo de combustão é baseado no ciclo de Rankine e a turbina a gás no ciclo Brayton;
- A plataforma termoquímica de gaseificação está sendo utilizada amplamente na indústria de carvão para obtenção de metanol [ISAF, 2008], e na obtenção de energia elétrica, possuindo plantas piloto e comerciais dessa tecnologia, algumas dessas plantas estão descritas na tabela 4.1. Dessa forma, pode haver um aproveitamento dessa tecnologia para biomassa, principalmente para bagaço/palha de cana-de-açúcar já que hoje não existem plantas comerciais com essa tecnologia;

Tabela 4-1 - Plantas industriais de gaseificação

Planta	Ano	Região	País	Tecnologia	Produto Principal	Matéria-Prima
Sulcis IGCC Project	2009	Europa	Itália	Gaseificação Shell	Energia Elétrica	Carvão
Mesaba Energy Project	2013	América do Norte	Estados Unidos	Gaseificação Conoco-Phillips	Energia Elétrica	Carvão
Nakoso IGCC	2007	Ásia	Japão	Gaseificação MHI	Energia Elétrica	Carvão
Edwardsport IGCC	2011	América do Norte	Estados Unidos	Gaseificação GE	Energia Elétrica	Carvão
Orlando Gasification Project	2010	América do Norte	Estados Unidos	Gaseificação KBR	Energia Elétrica	Carvão
East Dubuque Fischer Tropsch	2011	América do Norte	Estados Unidos	Gaseificação Conoco-Phillips	Biocombustível	Carvão
Secure Energy Systems SNG	2009	América do Norte	Estados Unidos	Gaseificação Siemens SFG	Combustível Gasoso	Carvão
GE China 3	2005	Ásia	China	Gaseificação GE	Químicos	Carvão
Americentrale Fuel Gas Plant	2000	Europa	Holanda	Gaseificação Lurgi	Energia Elétrica	Biomassa resíduo
Varkaus ACFBG Plant	2001	Europa	Finlândia	Gaseificação Foster Wheeler	Combustível gasoso	Biomassa resíduo

Fonte: [NETL, 2008].

Conforme descrito no capítulo 2, a metodologia de comparação das tecnologias de segunda geração será a "5E" [SCHUETZLE, 2007; REIINTERNATIONAL, 2008],

Uma característica importante da rota bioquímica, diferentemente da rota termoquímica, é a dependência direta da composição química e da estrutura física da biomassa. Isso é fundamental para a escolha da tecnologia que será utilizada. Os principais componentes da biomassa são:

- Lignina: composta de fenólicos aromáticos;
- Hemicelulose: composto de pentoses;
- Celulose: polímero de elevada massa molecular composta basicamente de glicose (Hexose);
- Inorgânicos: compostos minerais.

A figura 4.3 demonstra a estrutura da parede celular de forma gráfica e a tabela 4.2 informa a participação dos principais componentes da cana-de-açúcar. É relevante ressaltar que existe a possibilidade de melhoria genética, o que geraria pequenas alterações na composição da cana-de-açúcar.

Figura 4-3 – Arranjo típico da parede celular vegetal [MURPHY; MCCARTHY, 2005]

Tabela 4-2 - Percentual típico dos componentes de bagaço de cana-de-açúcar

Componente	Percentual em massa
Lignina	23% - 28%
Hemicelulose	12% - 26%
Celulose	31% - 44%

Fonte: [EERE, 2008].

4.2.1 Tratamento Mecânico

Primeiramente, a biomassa passa por um processo de limpeza e adequação mecânica para a obtenção de uma boa eficiência nas próximas etapas, já que cada tecnologia possui uma caracterização geométrica ^{4.1} específica.

É interessante verificar que os resíduos dessa limpeza podem ser reaproveitados em outras etapas do ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Entretanto, é importante ter cuidado na escolha da tecnologia para reduzir a perda de matéria-prima, por exemplo, a limpeza a seco.

4.2.2 Pré-tratamento - Hidrólise Hemicelulose

Esta etapa do processo tem como objetivo realizar a separação dos componentes da matéria-prima, possibilitando que haja a separação da hemicelulose e/ou lignina, que é solubilizada. Além disso, este processo realiza a hidrólise da hemicelulose, conversão em açúcares da hemicelulose. Os demais produtos, lignina e celulose, são encaminhadas para a hidrólise da celulose. A figura 4.4 demonstra de forma simplificada a função desta etapa.

Figura 4-4 - Esquema simplificado da meta do pré-tratamento de biomassa [MOISER *et al.*, 2005].

^{4.1} Caracterização geométrica: Identifica as principais propriedades geométricas, algumas delas são: esfericidade, densidade aparente da partícula, porosidade, distribuição das partículas do conglomerado, superfície específica [CORTEZ; LORA, 2006].

Uma característica importante a ser considerada nesta etapa é a questão dos resíduos que são criados, para não prejudicar as etapas posteriores, principalmente a hidrólise da celulose e da fermentação. Outro ponto importante é que esta etapa é significativa em termos de custo no processo de aproveitamento de celulose [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAALJ, 2005], já que ela representa um custo superior a 33%.

As principais tecnologias podem ser divididas em processos químicos e físicos, que são detalhados a seguir.

4.2.2.1. Processos Físicos

Os processos físicos são as tecnologias que utilizam apenas as características físicas de fluídos para obter os objetivos, estes processos podem ser divididos em:

Explosão de vapor / Pré-tratamento de vapor (ST/SE)

Processo com a finalidade de solubilizar a hemicelulose de forma a facilitar a hidrólise da celulose e diminuir a formação de inibidores. O processo consiste na colocação de biomassa em um tanque, que recebe vapor a altas temperaturas (acima de 240°C) e pressão durante alguns minutos. Depois, a biomassa sofre um rápido resfriamento.

A principal diferença entre a explosão de vapor e o pré-tratamento de vapor é que na primeira, a biomassa recebe uma rápida descompressão e resfriamento após o tempo de injeção de vapor, o que resulta na "explosão" da água contida na biomassa.

Nota-se pelas publicações que o pré-tratamento com vapor está em desuso, devido à criação de ácidos. Outro fator é que as condições para a realização do tempo de reação, pressão e temperatura dependem da biomassa que está realizando o pré-tratamento. Por exemplo, biomassa com alto teor de xilose deve possuir condições mais brandas que aquelas que possuem baixo teor de xilose (alto teor de glicose) [KAAR; GUTIERREZ; KINOSHITA, 1998].

É interessante notar que há artigos que citam experimentos neste tipo de pré-tratamento com bagaço de cana-de-açúcar, informando rendimentos e condições realizadas [KAAR; GUTIERREZ; KINOSHITA, 1998; LASER *et al.*, 2002].

Termo-hidrólise (LHW - Liquid Hot Water)

Este processo é similar ao processo de explosão a vapor, a principal diferença é que, ao invés de utilizar o vapor, utiliza-se água quente e pressurizada. Além disso, o resultado obtido possui um grau de solubilização maior que a explosão de vapor, visto que existe uma maior injeção de água.

Uma vantagem desse processo é a recuperação de xilose da ordem de 88 - 98%, sem a necessidade de catalisadores químicos, o que o torna economicamente interessante e ambientalmente atrativo [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAAIJ, 2005].

Realizando uma comparação entre os dois processos físicos, tem-se uma diferença grande entre a solubilização da amostra, o que resulta em uma vantagem do LHW, pois diminui o risco de degradação do furfural e da precipitação da lignina [LASER *et al.*, 2002].

4.2.2.2. Processos Químicos

Os processos químicos são as tecnologias que utilizam componentes químicos (ácidos e bases) para obter os seus objetivos, esses processos podem ser divididos em:

Hidrólise ácida

A hidrólise ácida consiste no processo de utilização de ácido sulfúrico concentrado, diluído ou nítrico para a realização do pré-tratamento. O método consiste em utilizar um vaso, que geralmente é aquecido, para realizar a reação da biomassa com o ácido em questão, existindo a necessidade do reaproveitamento deste material devido à viabilidade econômica. Alguns pontos contrários a esta tecnologia são a questão da necessidade de neutralização antes da fermentação para que não ocorra a inibição; a questão do risco de operação com produtos perigosos; e o custo da instalação para que os materiais suportem as condições agressivas do fluido reagente.

O ácido sulfúrico diluído (0,5 a 1,5%, temperatura acima de 160°C) é o insumo mais utilizado para plantas industriais [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAAIJ, 2005] devido a seus bons resultados, como o alto rendimento de recuperação de açúcares (75 - 90%). Outra característica deste processo é o seu melhor rendimento para a produção de metano do que para a produção de etanol; entretanto, há necessidade de um melhor controle para a questão da volatilização da lignina.

Hidrólise alcalina

Este processo é realizado em condições brandas, pressão e temperatura baixa, utilizando como principais catalisadores o hidróxido de sódio ou o hidróxido de cálcio. Uma característica negativa deste processo é o tempo de residência, visto que este é da grandeza de horas e dias, diferentemente dos outros processos [MOISER *et al.*, 2005]. Sua vantagem é que praticamente toda a lignina e parte da hemicelulose são removidas, resultando em uma potencialização da reação de celulose para a próxima etapa.

Quando se realiza uma comparação desse processo com o pré-tratamento de ácido, verifica-se que a condição de operação da hidrólise alcalina é menos corrosiva, resultando em um custo de implantação menor do que a da hidrólise ácida, já que não existe a necessidade de utilização de materiais especiais. Entretanto, o custo de operação desse processo é superior à hidrólise ácida, devido ao alto custo do reagente e da alta quantidade necessária. Além disso, existe o custo ambiental, que pode inviabilizar essa tecnologia [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAAIJ, 2005].

Organosolv

Este processo consiste na utilização de um solvente orgânico com água, que pode ser glicerol, dimetil formamida, acetato de etila. Porém, os mais utilizados são as soluções de álcool-água (metanol-água, etanol-água, butanol-água).

Este processo é realizado em duas etapas para que se obtenha um bom resultado. A primeira etapa, pré-hidrólise, realiza a retirada da fração hemicelulósica, e a segunda, é responsável pela deslignificação e solubilização da lignina feita através da injeção de organosolv. É válido informar que essa divisão em duas etapas é devido à degradação da hemicelulose quando realizadas as etapas juntas.

É interessante notar que os solventes devem ser retirados do sistema para que não ocorra inibição nas próximas etapas e para seu reaproveitamento parcial para uma redução de custos.

Há artigos que apresentam os resultados desse processo para o bagaço de cana-de-açúcar, como dissertação de mestrado [SOUZA, 1984] e artigos [PASQUINI *et al.*, 2005]. Este último realizou diversas experiências com diferentes condições de processo para deslignificação do bagaço, sempre com uma combinação de água-etanol com CO₂ a altas pressões. O melhor desempenho (88,4% de deslignificação) foi obtido a 16 MPa e 190°C, com mistura de água-etanol na proporção volumétrica de 1:1 com tempo de reação de 1 hora. Este mesmo autor propôs outro experimento com butanol-água, no qual obteve 94,5% de deslignificação a 7 MPa, 190°C e 105 minutos de tempo de residência e 60% de butanol na mistura.

4.2.2.3. *Processos Biológicos*

Os processos biológicos utilizam fungos para realizar o pré-tratamento, o que resulta em um processo com condições brandas de pressão/temperatura e com pouca utilização de energia. Entretanto, este processo possui tempo de reação muito elevado, o que limita, atualmente, suas aplicações industriais, e alguns tipos de fungos degradam a lignina, ou seja, perde-se matéria-prima [SÁNCHEZ; CARDONA, 2008].

4.2.2.4. *Processos Combinados*

AFEX (Ammonia Fiber/Freeze Explosion)

Este processo consiste no trabalho de um reator em alta temperatura (160° C a 180°C) e pressão, no qual existe a injeção de biomassa e do reagente, que é uma solução de amônia (5% a 15%). Após realizar o tempo de reação (alguns minutos), ocorre o resfriamento e a descompressão rápida da solução.

Este processo foi testado com o bagaço possuindo uma recuperação superior a 90% de hemicelulose e celulose [SUN; CHENG, 2002]. Uma característica deste processo é não apresentar bom desempenho quando realizado com biomassa que contenha alto teor de lignina.

Dois fatores negativos dessa tecnologia são: o custo do processo, que está diretamente ligado ao custo da amônia, que deve ser recuperada para que haja viabilidade econômica; e a ocorrência da degradação dos açúcares que reduz a eficiência das etapas posteriores [MOISER *et al.*, 2005].

Explosão de vapor catalisada

Este processo é similar à explosão de vapor com a inclusão de ácido ou CO₂ para que haja uma redução na formação de inibidores e melhora no aproveitamento da xilose como monômero [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAAIJ, 2005].

Explosão de CO₂

Este processo é similar à explosão de vapor e AFEX, porém o fluido de reação é o CO₂, o que resulta na formação de ácido que hidrolisa a hemicelulose. Tem como vantagem o custo inferior comparado com o AFEX, mas possui rendimento inferior à explosão de vapor e AFEX [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAAIJ, 2005; HENDRIKS; ZEEMAN, 2009].

4.2.2.5. Tendências

Existem diversas tecnologias que podem ser comercialmente efetivas nos próximos cinco anos; porém, atualmente, o tratamento com ácido diluído é o mais desenvolvido, tendo como tecnologia promissora a explosão de vapor e explosão de vapor catalisada, devido às características já apresentadas neste capítulo.

Uma evidência da utilização da tecnologia de explosão de vapor catalisada é que duas das plantas de demonstração existentes de grandes empresas de etanol celulósico, ABENGOA e IOGEN, utilizam esta tecnologia para a realização do pré-tratamento [ABENGOA, 2009; IOGEN, 2009].

4.2.3 Hidrólise Celulose

Esta etapa do processo tem como objetivo realizar a hidrólise celulose, que é a conversão da celulose em glicose, conforme fórmula (4.1). É interessante notar a importância da etapa de pré-tratamento, visto que o rendimento deste processo é superior a 90% quando há pré-tratamento e inferior a 20% quando não tem a etapa anterior [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAAIJ, 2005].

A hidrólise celulose pode ser classificada em dois grupos: hidrólise ácida, que é subdividida em hidrólise ácida concentrada e hidrólise ácida diluída, e hidrólise enzimática.

4.2.3.1. *Hidrólise Ácida*

A hidrólise ácida utiliza ácido concentrado e/ou ácido diluído. Este processo consiste na produção dos seguintes compostos: hexones (açúcares de 6 carbonos), principalmente glicose, galactose e manose; pentoses (açúcares de 5 carbonos), principalmente xilose e arabinose.

Hidrólise Ácida concentrada

Os processos da hidrólise com ácido concentrado que podem ser citados são os de Bergius e Udic Rheinau, que utilizam ácido clorídrico com concentração de 40 a 45%, e o processo Riga, que utiliza ácido sulfúrico a 75%. As desvantagens deste processo são o custo da implantação, custo de manutenção dos equipamentos e o risco de acidentes devido à condição corrosiva do processo. Todavia, a eficiência deste processo é elevada e com baixa degradação dos açúcares.

Hidrólise Ácida diluída

Este processo é o mais antigo de conversão de celulose para etanol, sendo a primeira planta comercial de 1898. Um dos processos que pode ser citado é o Scholler, que utiliza ácido sulfúrico na hidrólise de madeira em processo de batelada; porém, apresenta rendimentos baixos (45 a 55%) para permitir a viabilidade comercial [SOUZA, 1984].

Pode-se dividir em dois estágios: o primeiro é a recuperação dos açúcares de 5-C que possui condições de processo brandas, diferentemente do 2º estágio, que possui condições mais severas e serve para a recuperação dos açúcares de 6-C. Os rendimentos de recuperação são de 89% de manose, 82% de galactose e somente 50% de glicose [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAAIJ, 2005].

A Dedini Hidrólise Rápida (DHR) é uma tecnologia brasileira referente à hidrólise ácida, que utiliza um processo de organosolv em conjunto com a hidrólise ácida

diluída; ou seja, realiza a sacarificação e deslignificação simultânea. A vantagem desse método é a questão de utilizar ácido bem diluído, reduzindo custo com material dos equipamentos. Ele pode ser melhorado para que não haja degradação da lignina em contato com o ácido.

4.2.3.2. *Hidrólise Enzimática*

A hidrólise enzimática utiliza como catalisador enzimas genericamente chamadas de celulasas e o resultado deste processo são os açúcares redutores, incluindo a glicose. Outra característica deste processo são as condições brandas (4,8pH e temperatura de 45 - 50°C), o que reduz o custo do empreendimento, bem como o custo de manutenção, quando comparado com a hidrólise ácida.

Outra característica deste processo é a sua menor degradação dos açúcares, quando comparado com a hidrólise ácida, apesar de possuir um tempo de reação maior. Dessa forma, este processo apresenta melhores resultados para as demais fases do processo de produção de etanol celulósico [SÁNCHEZ; CARDONA, 2008].

A celulase pode ser produzida na própria planta industrial, em um reator separado ou comprada de um fornecedor. Pode-se fazer uma analogia com o processo de fermentação, em que o vinho levedurado pode ser recuperado na centrífuga para ser utilizado em outra batelada do processo. Os especialistas desta área prevêem que este processo irá ter uma grande evolução, que irá ocorrer uma redução de custos e que esta tecnologia será a principal tecnologia de etanol celulósico, possuindo custo competitivo na plataforma bioquímica.

4.2.3.3. *Comparativo das Hidrólises*

A tabela 4.3 apresenta um comparativo das tecnologias de hidrólise da celulose.

Tabela 4-3 - Rendimentos das tecnologias de hidrólise da celulose

Tecnologia	Consumíveis	Temperatura	Tempo	Sacarificação
Ácido Diluído	~1% H ₂ SO ₄	180°C	45 min	82%
Ácido Concentrado	70% H ₂ SO ₄	50°C	60 min	88%
Enzimático	Celulase	50°C	60 min	95%

Fonte: [SEABRA, 2008].

4.2.3.4. Fermentação

A fermentação é o processo de conversão dos açúcares de 6-C (hexoses) e 5-C (pentoses) para álcool, sendo que a tecnologia para a fermentação das hexoses é conhecida há muito tempo, desde a época dos egípcios há 6000 anos. Esses açúcares são metabolizados pela levedura *S. cerevisiae*, as quais não processam os açúcares de 5-C. Atualmente, as empresas de biotecnologia estão desenvolvendo leveduras que sejam capazes de processar de maneira industrial e eficiente as pentoses, e já estão obtendo êxito.

As pesquisas demonstram uma tendência na compatibilização das reações de fermentação de hexoses e pentoses, possibilitando que as duas reações sejam realizadas em um mesmo reator, ocorrendo dessa forma uma redução no número de reatores e no custo da utilização desta tecnologia. Outra tendência é o avanço genético da levedura, para que ocorra uma melhor eficiência na fermentação de pentoses.

Este processo possui como principal resíduo a lignina, que é encaminhada para o processo termoquímico, ver figura 4.2, e será utilizada na queima em caldeiras para a produção de energia elétrica, ou como matéria-prima de produtos como emulsificantes, adesivos, dispersantes, etc. [KAMM B.; GRUBER; KAMM M., 2006].

Esta etapa do processo pode ser integrada com as etapas anteriores de diversas formas, sendo que as figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 demonstram essas formas, que, de maneira simplificada, podem ser assim descritas:

SHF - Separate Hydrolysis Fermentation

Nesta configuração, todas as etapas da produção de etanol celulósico são separadas, inclusive a fermentação de hexoses e pentoses, o que possibilita que cada etapa seja realizada na sua condição ótima. Porém, existe a possibilidade da formação de resíduos inibidores para a etapa seguinte. Essa foi a primeira forma de implementação de hidrólise enzimática, onde simplesmente houve a substituição da hidrólise ácida, trabalha nessa configuração, pelas enzimas. A figura 4.5 demonstra de forma gráfica esse processo.

Figura 4-5 - Esquema simplificado do SHF [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAALJ, 2005].

SSF- Simultaneous Saccharification and Fermentation

A configuração SSF de produção de etanol celulósico corresponde à hidrólise de celulose e fermentação sendo realizadas juntas em um mesmo reator, resultando na redução de inibidores. Entretanto, quando realizada esta configuração, a definição do tempo de residência é crítico, visto que existe a necessidade do tempo ser longo o suficiente para uma boa eficiência na hidrólise e curto o bastante para que não torne inviável o custo da celulase [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAALJ, 2005]. A figura 4.6 demonstra de forma gráfica esse processo.

Figura 4-6 - Esquema simplificado do SSF [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAALJ, 2005].

SSCF - Simultaneous Saccharification and CoFermentation

Nesta configuração, as etapas de hidrólise de celulose e fermentação das pentoses e hexoses são realizadas em um mesmo reator. Esta configuração está

sendo testada em plantas pilotos e sua consolidação está prevista para médio prazo [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAALJ, 2005]. A figura 4.7 demonstra de forma gráfica esse processo.

Figura 4-7 - Esquema simplificado do SSCF [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAALJ, 2005].

CBP - Consolidated Bioprocessing

Nesta configuração, todas as etapas da produção de etanol celulósico são realizadas em um mesmo reator, chamado reator do bioprocesso, conforme demonstrado na figura 4.8, inclusive a produção de celulase.

Figura 4-8 - Esquema simplificado do CBP [HAMELINCK; HOOIJDONK; FAALJ, 2005].

4.3 Plataforma Termoquímica

A plataforma Termoquímica é o processo que utiliza pressão e calor para realizar a conversão da celulose em carbonos, sendo que esses carbonos podem ser convertidos em biocombustível, energia elétrica e vapor. Essa plataforma possui as seguintes características positivas [EERE, 2008c]:

- é aplicada a qualquer tipo de biomassa, diferentemente da plataforma bioquímica;

- realiza o aproveitamento do resíduo, lignina, da plataforma bioquímica; ou seja, a plataforma termoquímica é complementar à plataforma bioquímica, conforme demonstrado na figura 4.2;
- realiza a integração da plataforma biorefinaria, já que possui a flexibilidade/possibilidade de realizar a produção de biocombustível, energia elétrica e vapor.

Esta plataforma é mostrada na figura 4.9, que apresenta as duas principais tecnologias: gaseificação e pirólise, que realizam a conversão da biomassa em carbono, seguindo as suas principais tecnologias que serão detalhadas posteriormente. É válido informar que, apesar da combustão ser um processo termoquímico, ela não será considerada nesta análise, pois a mesma é considerada na 1ª geração e sua eficiência é inferior a qualquer uma das tecnologias mencionadas.

O condicionamento e limpeza do gás síntese não são detalhados neste estudo, porém esses processos têm como objetivo realizar a retirada de ácidos e CO_2 do gás síntese, a retirada de impurezas resultantes do processo de gaseificação e o aumento do nível de H_2 e CO .

No capítulo 5 desta dissertação, realizar-se-á uma análise de desempenho, considerando a tecnologia BIG/GTCC, que produz energia elétrica e vapor. É válido ressaltar que este trabalho não possui foco nas tecnologias de obtenção do produto final e etapas intermediárias. Dessa forma, a dissertação não detalha essas etapas, que podem ser consultadas, por exemplo, em artigo [FAAIJ, 2006].

Figura 4-9 – Processo geral - plataforma termoquímica [NETO, 2009]

4.3.1 Gaseificação

A gaseificação é a conversão de Biomassa, ou qualquer combustível sólido em gás síntese. Este processo é caracterizado pela realização da oxidação parcial em alta temperatura (800 - 900°C) da matéria-prima, por ser um processo exotérmico e por sua necessidade de injeção de um agente oxidante. Essas duas últimas características são diferenças básicas do processo de pirólise, visto que na pirólise o processo é endotérmico; ou seja, existe a necessidade de um combustível auxiliar e não utiliza a injeção de um agente oxidante.

Existem diversos tipos de reatores para a realização da gaseificação, que são caracterizados pelo poder calorífico do gás produzido, pressão de trabalho, agente oxidante e direção do movimento relativo da biomassa. A seguir, são detalhadas as principais características dessa tecnologia.

As reações químicas que ocorrem no processo de gaseificação são:

É interessante informar que metano e hidrogênio são formados simultaneamente com as reações acima, visto que sua reação é:

A tabela 4.4 demonstra as principais aplicações dessa tecnologia.

Tabela 4-4 - Características de tecnologias de conversão.

Gaseificação	Tamanho (MW)	Aplicação	Sist. de limpeza requerido princ.
Leito Fluidizado Circulante (CFB)	20 - 150	Caldeira, fornos	Ciclone, filtração
Leito Fluidizado Borbulante (BFB)	10 – 50	Caldeira, fornos	Reforma catalítica
Leito Fluidizado Borbulante (BFB)	10 – 50	Máquinas	Reforma catalítica
BFB e CFB pressurizado	50 - 300	Turbinas a gás	Filtração a 400° - 550°C
Gaseificação com vapor	100 - 500	Químicos, células combustível	H ₂ , Reforma catalítica de e condicionamento do gás

Fonte: [BABU, 2006].

4.3.1.1. Gaseificadores de Leito Fixo

Os gaseificadores de leito fixo são utilizados para pequenas plantas e podem ser do tipo contra-corrente e concorrente, conforme descrito a seguir.

O gaseificador em contra-corrente é mostrado na figura 4.10, onde a entrada de ar fica na parte de baixo do gaseificador e o combustível é inserido pela parte superior do reator através da força gravitacional. Esse tipo de reator é simples, recomendado para pequenas quantidades, visto que possui como vantagem a sua facilidade de operação e como desvantagem a obtenção do gás com elevado nível particulado.

Figura 4-10 – Gaseificador de leito fixo - contra-corrente [CORTEZ; LORA, 2006]

Nos gaseificadores concorrentes, figura 4.11, a alimentação do combustível é pelo topo; porém, a alimentação de ar é realizada em fluxo descendente, o que resulta na passagem do agente oxidante pelas zonas de combustão e redução, possibilitando que o alcatrão formado seja convertido em fase leve e coque.

Figura 4-11 – Gaseificador de leito fixo - concorrente [CORTEZ; LORA, 2006]

4.3.1.2. Gaseificadores Leito Fluidizado

Esse tipo de gaseificador foi desenvolvido para reduzir os problemas operacionais dos gaseificadores de leito fixo, principalmente para matérias primas com alto teor de cinzas e para capacidades maiores. Este tipo de tecnologia é dividida em Leito Fluidizado Borbulhante (BFB) e Leito Fluidizado Circulante (CFB), sendo que o CFB (figura 4.12) é recomendado para sistemas de larga escala (40-100MW) enquanto que o BFB para escala média (15-40MW) [OPET, 2002].

A diferença básica entre eles é que no circulante os sólidos são retornados para o fundo do reator, o que possibilita a queima desse material. Isso não ocorre no BFB, em que o sólido é retirado do sistema (figura 4.13).

Figura 4-12 – Gaseificador CFB [ENGSTROM, 1999]

Figura 4-13 – Gaseificador BFB / CFB [WILLIAMS; LARSON, 1996]

4.3.1.3. Gaseificadores de Leito Arrastado

Neste tipo de tecnologia, há injeção de oxigênio e vapor, que pulveriza a biomassa, a qual juntamente com as cinzas são fundidas. Esse tipo de processo resulta na formação de uma escória que desce para um tanque de água. É interessante ressaltar, que esse tipo de aplicação, na Europa, já possui plantas comerciais [KWANT; KNOEF, 2004].

Figura 4-14 – Gaseificador de Leito Arrastado [GRABOWSKI, 2004]

4.3.2 Pirólise

É o processo termoquímico mais adequado para a conversão de biomassa para bio-óleo. É baseada na destruição térmica da biomassa na ausência de ação reagente, oxigênio ou ar. O processo de pirólise começa com 350 - 550 °C e vai para 700°C, produzindo gás, bio-óleo e carvão, sendo que a proporção de cada um depende das condições dos processos utilizados.

O processo de pirólise pode ser dividido nos seguintes tipos:

4.3.2.1. *Pirólise Lenta*

Este processo possui a taxa de aquecimento baixa (5-7°C/min); ou seja, aquecimento lento, com o intuito de priorizar a formação de carvão, ao invés de bio-óleo e gás. Atualmente, este processo é um dos mais utilizados quando escolhida a pirólise. Ele já foi experimentado para cana-de-açúcar com os resultados de 23 - 28% de carvão e com o máximo de extração de óleo de 28,6%, utilizando reator de leito fixo.

4.3.2.2. *Pirólise Rápida*

Este processo possui a taxa de aquecimento alta (300°C/min); ou seja, aquecimento rápido, porém não se aproxima da pirólise flash e tem como objetivo priorizar a formação de bio-óleo. É interessante notar que o reator mais utilizado é o de leito fluidizado circulante, apesar de existirem boas experiências com qualquer tipo de reator. Experiências demonstram uma grande eficiência na produção de bio-óleo nesse processo, chegando à obtenção de 68% com uma temperatura de 550°C e particulado de 0,6 - 0,85 mm, taxa de aquecimento de 300°C/min e vazão de N₂ de 100 cm³/min.

4.3.2.3. *Pirólise Flash*

A pirólise flash é realizada em poucos segundos, resultando em uma taxa de aquecimento muito alta e a necessidade de um reator especial, visto que o tempo de residência é muito baixo. Os únicos reatores que atendem a essa aplicação são o leito fluidizado e reator de leito arrastado (ver figura 4.15) [GOYAL; SEAL; SAXENA, 2008].

Este processo está sendo considerado como um dos principais processos para aumentar a eficiência para a obtenção de bio-óleo e gás.

A Pirólise *Flash* pode ser realizada conforme as seguintes tecnologias:

Hidro-Pirólise *flash*: é a pirólise realizada em uma atmosfera de hidrogênio, chegando a pressões até 20 MPa;

Rapid thermal process: é uma transferência de calor com um tempo de residência muito curto, entre 30ms a 1,5s, utilizando temperatura entre 400°C e 950°C. Devido à rápida conversão térmica, a viscosidade do produto final é similar à do óleo diesel.

Pirólise Solar *Flash*: é a utilização da energia solar através de células solares para realizar a pirólise *flash*.

Pirólise *flash* sobre vácuo: É o processo de pirólise realizado em condições de vácuo, o que facilita a extração dos condensáveis.

Figura 4-15 – Pirólise de leito arrastado [DUPONT *et al.*, 2009]

4.3.2.4. Pirólise Catalítica

Este processo está sendo pesquisado para possibilitar a utilização de bio-óleo diretamente como combustível para transporte, diferentemente dos demais processos identificados anteriormente, que não produzem bio-óleo capaz de ser utilizado como combustível.

4.4 Plantas Comerciais de 2ª Geração

A Tabela 4.5 informa algumas plantas comerciais existentes ou em construção com a tecnologia de 2ª geração nos Estados Unidos e Canadá. É importante

informar que, atualmente, o Brasil não possui nenhuma planta comercial desta tecnologia.

Tabela 4-5 - Plantas comerciais em operação/construção

Empresa	Localização	Matéria-Prima	Capacidade (milhões de galões por ano)
Abengoa Bioenergy	Hugoton, EUA	Palha de trigo	30
BlueFire Ethanol	Irvine, EUA	Fontes Múltiplas	17
Mascoma	Lansing, EUA	Madeira	40
POET LLC	Emmetsburg, EUA	Espiga de milho	25
Range Fuels	Treulen County, EUA	Resíduo de madeira	20
SunOpta	Little Falls, EUA	Pedaços de madeira	10
Xethanol	Auburndale, EUA	casca de cítrico	8
logen	Saskatchewan, CA	Palha de trigo	30

Fonte: [GRAINNET, 2009].

4.5 Comparativo da Plataforma Bioquímica e Termoquímica

Este item apresenta um comparativo entre as tecnologias de 2ª geração, utilizando como base a comparação de uma tecnologia de cada plataforma, baseado em relatórios governamentais e na disponibilidade de informação, podendo assim não ser a melhor tecnologia a ser comparada. Ao final deste item é apresentada uma tendência qualitativa das plataformas, realizando uma comparação baseada em artigos, na evolução de plantas comerciais e restrições técnicas informadas neste capítulo.

4.5.1 Comparativo da plataforma bioquímica e termoquímica

A principal referência utilizada para este comparativo é o Relatório Etanol de Biomassa - Avaliação das tecnologias de produção da Comissão de Energia da Califórnia [CEC, 2007], que avaliou diversas tecnologias, sendo que as principais são demonstradas na tabela 4.6.

Tabela 4-6 - Tecnologias de conversão de biomassa em biocombustíveis e energia elétrica.

Item	Tecnologia	Produto Primário	Energia	Biocombustível
T	Termoquímica			
T1	Pirólise com reforma de vapor (sem oxigênio ou ar)	Syngas	Eletricidade e calor	Bioetanol, Bioalcool, Biodiesel
T2	Gaseificação (com oxigênio e ar)	Syngas	Eletricidade e calor	Bioetanol, Bioalcool, Biodiesel
T3	Gaseificação em alta temperatura (>1930 °C) (com oxigênio e ar)	Syngas	Eletricidade e calor	Bioetanol, Bioalcool, Biodiesel
T4	Pirólise Térmica (sem oxigênio ou ar)	Biocombustível não refinado	Não Aplicável	Biodiesel Refinado
T5	Oxidação Térmica (Combustão e/ou próximo estequiometria)	Calor	Eletricidade	Não Aplicável
T6	Conversão/Oxidação Termoquímica Integrada	Calor	Eletricidade	Não Aplicável
B	Bioquímica			
B1	Digestão Anaeróbica	Biometano	Não Aplicável	Bioetanol, Bioalcool, Biodiesel
B2	Bioquímica (Hidrólise ácida / Fermentação)	Açúcares	Não Aplicável	Bioetanol
B3	Bioquímica (Hidrólise enzimática / Fermentação)	Açúcares	Não Aplicável	Bioetanol
B4	Outros Processos Biológicos	Biometano, Biohidrogênio Bioalcool	Não Aplicável	Não Aplicável
I	Integrado			
I1	Biorefinaria integrada com geração de energia e calor de resíduos	Bioalcool	Eletricidade e calor	Bioetanol
I2	Fermentação de Syngas - processos termoquímicos	Bioetanol	Não Aplicável	Não Aplicável
I3	Processos Termoquímicos (Catálise)	Biosyngas	Bioalcool, Biodiesel	Eletricidade e calor
I4	Processos Termoquímicos (reformas e Catálise)	Biometano	Bioalcool, Biodiesel	Eletricidade e calor
I5	Processos Bioquímicos	Biometano Biosyngas	Bioalcool	

Fonte : [CEC, 2007]

Utilizando a metodologia 5E apresentada no capítulo 2, foram escolhidas três tecnologias para realizar uma comparação, possuindo como principal critério a disponibilidade de informações:

- hidrólise enzimática (plataforma bioquímica) para produção de etanol e energia elétrica (PB I) ;
- pirólise com reforma de vapor (plataforma termoquímica) para a obtenção de biocombustível e energia elétrica (PT I);
- pirólise com reforma de vapor (plataforma termoquímica) para geração de energia elétrica (PT II).

A tabela 4.7 apresenta os dados da comparação. Considerando-se a metodologia 5E, verifica-se que a pirólise com reforma de vapor (plataforma termoquímica) para a obtenção de biocombustível e energia elétrica (PT I) possui melhor resultado em todos os índices avaliados, pois possui maior eficiência energética, menor índice de emissões e menor custo de capital e custo por produto acabado. Além disso, os índices de poluição do PB I são similares aos de uma planta de combustão.

É interessante ressaltar que no processo PT II foi assumido como premissa 75% de taxa de conversão de energia térmica e 40% de taxa de conversão de gás síntese para energia elétrica. Além disso, o custo operacional já considera o custo de matéria-prima como US\$ 45,00 por tonelada de insumo.

Tabela 4-7 - Comparativo de Plataformas bioquímica e termoquímica

	PB I	PT I	PT II
Capacidade da Planta (t/dia)	2002	454	454
Produtos (E1)			
Etanol (L / t)	220	298	N/A
Energia elétrica (kWh/t)	222	605	1518
Eficiência Energética (E2)	33%	50%	28%
Emissões da planta (E3)			
NO _x (g/ GJ saída)	117	4	8
SO _x (g/ GJ saída)	256	0,3	0,7
Particulado - PM (g/ GJ saída)	31	5	14
CO (g/ GJ saída)	117	48	135
Composto orgânico volátil (g/ GJ saída)	10	1	3
CO ₂ (kg/ GJ saída)	207	130	298
Fatores Econômicos (E4)			
Custo de Capital (US\$M)	205	66	60
Custo Operacional (US\$M / ano)	107	15	16
Custo de produção de energia elétrica (US\$/kWh)	N/A	0,071	0,071
Custo de produção do etanol (US\$ / L)	0,60	0,30	N/A

Fonte: [CEC, 2007] (N/A Não aplicável; Valores E1,E2,E4 incerteza de $\pm 15\%$; valores de E3 incerteza de $\pm 20\%$)

4.5.2 Tendência de aplicação das Plataformas

As tendências das tecnologias apresentadas neste capítulo são:

- A principal tecnologia referente à plataforma bioquímica é a Hidrólise Enzimática com pré-tratamento de explosão de vapor catalítica;
- A plataforma termoquímica possui várias tecnologias promissoras, dependendo muito do produto que será utilizado, porém existem algumas evidências que a gaseificação será a principal tecnologia;
- A plataforma bioquímica deve ser a primeira a ser consolidada, porém deve ficar obsoleta à medida que houver a consolidação da plataforma termoquímica, sendo os principais fatores: a questão do aproveitamento da lignina [PHILLIPS, 2007], não depender do tipo de biomassa e da flexibilidade dos produtos finais.

As evidências dos dois primeiros itens são demonstradas pelo número de pesquisadores que estão estudando essas tecnologias, pelas avaliações tecnô-
econômicas realizadas por centros de pesquisa como o DOE e pelas tecnologias que o governo americano está financiando para a construção das unidades de 2ª geração.

5 Integração de tecnologias de 2ª Geração em plantas existentes

5.1 Introdução

Este capítulo tem como finalidade demonstrar a eficiência energética obtida na integração de uma tecnologia de segunda geração em uma unidade industrial de produção de etanol de cana-de-açúcar, utilizando dados teóricos obtidos de relatórios governamentais.

A demonstração teórica da eficiência energética é dividida em quatro cenários com dois itens cada, considerando o consumo de vapor de processo de 500 kg por tonelada de cana (A) [CGEE, 2008] e o consumo de vapor de processo otimizado de 340 kg por tonelada de cana (B) [CGEE, 2008], que são:

- Cenário I - unidade industrial atual de processamento de cana-de-açúcar para a produção de etanol e energia elétrica, que não utiliza o bagaço excedente.
- Cenário II - refere-se a uma planta de processamento de cana-de-açúcar para a produção de etanol e energia elétrica, utilizando o bagaço excedente para a produção de energia elétrica por meio de turbinas de condensação. Esta configuração é, atualmente, o modelo mais utilizado nas implantações a partir de 2007.
- Cenário III - unidade industrial de processamento de cana-de-açúcar similar ao Cenário I, com uma unidade de BIG/GT anexa à unidade para o aproveitamento do bagaço excedente e 50% da palha para geração de energia elétrica.
- Cenário IV - unidade industrial de processamento de cana-de-açúcar para a produção de etanol e energia elétrica, integrada a uma planta de segunda geração do tipo BIG/GT, utilizando todo o bagaço e 50% da palha fornecendo vapor/energia elétrica para a planta industrial de 1ª geração e repassando a energia elétrica excedente.

Por ser uma tecnologia da plataforma termoquímica, a tecnologia de Gaseificação integrada com turbina a gás (BIG/GT) é escolhida, pois aproveita toda a matéria-prima e possibilita a utilização de dados descritos em publicações.

Após a explanação dos cenários, realiza-se um estudo de caso, refazendo os cenários II, III, IV para uma planta industrial de processamento de cana-de-açúcar existente. É válido informar que esta dissertação não faz um estudo de caso para o cenário com otimização de vapor (B), porque há necessidade de simulação de todos os processos de forma detalhada para que haja consistência nos dados de consumo de vapor otimizado. Além disso, haveria necessidade de troca de diversos equipamentos, que poderiam inviabilizar o investimento. Dessa forma, o estudo de caso para o cenário B é um tópico para estudos posteriores.

Não é verificada também, de forma detalhada, a eficiência de tecnologias da plataforma bioquímica, visto que já existem alguns trabalhos publicados [DIAS, 2008]. Neste trabalho, é realizado um cálculo de eficiência, baseado nas condições de contorno de um trabalho de referência na plataforma bioquímica [DIAS, 2008].

5.2 Cenários

Os cálculos dos cenários foram realizados de forma simplificada, pois não se tem as informações para realizar o cômputo dentro das tecnologias; ou seja, considera-se o modelo "caixa-preta" para as etapas industriais, sendo que as figuras posteriores mostram os fluxogramas de processo. O Apêndice I apresenta todas as fórmulas, dados e suas referências. A Tabela 5.1 apresenta os principais valores utilizados nos cenários

Tabela 5-1 - Principais parâmetros do Cenário I

Parâmetro	Valor / Utilização	Premissa ou Referência
POL	14,53%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
Fibra	13,46%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
Palha	140 kg / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
Consumo de vapor	(A) = 500 kg / t cana (B) = 340 kg / t cana	[CGEE, 2008]
Caldeira	100 bar e 530°C	Premissa

Fonte: [NETO, 2009]

5.2.1. Cenário I - Planta Atual sem aproveitamento de bagaço excedente

A planta industrial considerada nesta dissertação é constituída de caldeira de alta pressão e turbinas de contrapressão, não realizando o aproveitamento de bagaço excedente [CGEE, 2008]. É válido ressaltar que esse cenário não é real, pois não há usina utilizando 100 bar que não tenha o aproveitamento do bagaço excedente, pois haveria um grande problema com a estocagem de bagaço.

A figura 5.1 mostra, de forma esquemática, o fluxograma de processo empregado para calcular a eficiência energética. O memorial de cálculo, considerando todas as premissas, fórmulas e valores estão localizados no Apêndice I.

Figura 5-1 - Fluxograma de processo simplificado - Cenário I [NETO, 2009]

A energia obtida nesta configuração é de 2248 MJ, constituída por 87L de álcool e 63 kWh de energia excedente por tonelada de cana processada, que resulta em um aproveitamento de 29% da energia contida na cana-de-açúcar. Realizando a otimização do consumo de vapor na planta (Cenário IB), existe um aproveitamento de 28%, visto que, neste cenário, não há o aproveitamento da palha e do bagaço excedente.

5.2.3. Cenário III - Planta Atual com aproveitamento do bagaço excedente através da tecnologia BIG/GTCC

Esta planta industrial é idêntica ao Cenário I, utiliza os dados informados na tabela 5.1; entretanto, realiza o aproveitamento do bagaço excedente e 50% da palha através da utilização de tecnologia BIG/GTCC.

O aproveitamento de apenas 50% da palha é devido à restrição da área agrícola, que utiliza a palha que permanece no campo devido a sua função de herbicida e de conservação de umidade da terra, entre outras.

A tecnologia BIG-GTCC é mostrada na figura 5.3. Basicamente, ocorre a gaseificação da Biomassa, processo de limpeza do gás para realizar o seu aproveitamento em turbina a gás, que possui como resíduo o gás a alta temperatura, que é aproveitado por uma caldeira de recuperação e turbina de condensação.

Figura 5-3 - Esquema simplificado de BIG/GTCC [LARSON, WILLIAMS, LEAL, 2001].

A tabela 5.2 e a figura 5.4 apresentam, de forma esquemática, do fluxograma de processo e os dados realizados no cenário III.

Tabela 5-2 - Principais parâmetros utilizados no Cenário III

Parâmetro	Valor / Utilização	Premissa ou Referência
Relação de BIG/GTCC	1,8 kg vapor / kWh	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
Bagaço Excedente (IIIA)	106 kg / t cana (50% umidade)	[NETO, 2009]
Palha	140 kg / t cana (50% utilização)	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]

Fonte: [NETO, 2009].

Figura 5-4 - Fluxograma de processo simplificado - Cenário III [NETO, 2009]

Este cenário considera a tecnologia BIG/GTCC, visto que não há interferência da área de processo da tecnologia de 2ª geração com a planta atual, exceto o deslocamento do bagaço excedente e da palha; ou seja, essa tecnologia não disponibiliza vapor para o processo.

O resultado desta configuração é a obtenção de 3029 MJ, constituída de 87L de álcool e 280 kWh de energia excedente por tonelada de cana processada, que resulta em um aproveitamento de 39,6% da energia contida na cana-de-açúcar. Realizando a otimização do consumo de vapor na planta (Cenário IIIB), existe um aproveitamento de 40,5% com a produção de 299 kWh/t cana.

5.2.4. Cenário IV - Planta de processamento de cana-de-açúcar 1ª geração integrada à tecnologia BIG/GT

Este cenário é a integração completa da planta de processamento de cana-de-açúcar de 1ª geração integrada com a tecnologia BIG/GT, considerando o aproveitamento total do bagaço (283 kg/t cana) e da palha na produção de vapor através do uso da tecnologia BIG/GT. Esta tecnologia é integrada à planta industrial, sendo constituída da figura 5.3 e da figura 5.5.

Figura 5-5 - Esquema simplificado de BIG/GT integrado à planta industrial - Adequação [LARSON, WILLIAMS, LEAL, 2001].

A figura 5.6 mostra, de forma esquemática, o fluxograma de processo realizado no cenário IV e o Apêndice I apresenta os valores obtidos.

Figura 5-6 - Fluxograma de processo simplificado - Cenário IV [NETO, 2009].

Este cenário possui os melhores rendimentos, obtendo 3052MJ, constituída de 87L de álcool e 286 kWh de energia excedente, que resulta em um aproveitamento de 39,8% da energia contida na cana-de-açúcar. Realizando a otimização do consumo de vapor na planta (Cenário IVB) existe um aproveitamento de 40,7% com a produção de 304 kWh/ t cana.

5.2.5. Comparação dos Cenários

Comparam-se aqui os cenários, através da análise dos resultados (base de cálculo – processamento de uma tonelada de cana) dos cálculos realizados nos itens anteriores, que estão detalhados no Apêndice I. A Tabela 5.3 apresenta esses principais valores, pelos quais se pode concluir que:

- Analisando os cenários IA e IB, verifica-se que estes são apenas teóricos, pois quando há uma melhoria no processo de geração de vapor (caldeira diferente de 21 bar), ocorre aumento da quantidade de bagaço excedente, que gera um grave problema de armazenagem, devido à quantidade e ao risco de incêndio;
- A melhoria no consumo de vapor de processo otimiza o rendimento da planta em no máximo 1% aproximadamente, o que demonstra que para um aumento efetivo de rendimento existe a necessidade de alteração de tecnologia, que ocorre no cenário III e IV, quando se utiliza tecnologia de segunda geração;
- Os resultados de eficiência energética dos cenários III e IV demonstram que o cenário IV é mais eficaz; porém, essa variação é de apenas 1% e o nível de mudança na usina existente é muito superior do que o cenário III. Dessa forma, há a necessidade de um estudo sobre a viabilidade econômica do cenário IV para usinas existentes, para verificar se o ganho obtido no aumento do rendimento energético é superior ao custo de implantação da nova tecnologia e mudanças da planta existente;
- Apesar de não ter sido demonstrado em cenários, a utilização de 50% da palha no cenário II não atinge a eficiência dos cenários III e IV, visto que a

eficiência da turbina a gás (Ciclo Brayton) é superior a da turbina a vapor (Ciclo Rankine) que com o mesmo consumo de vapor de processo.

Tabela 5-3 - Comparação dos resultados dos Cenários (processamento de uma tonelada de cana)

CARACTERÍSTICA	CENÁRIOS							
	IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	IVA	IVB
Energia de entrada (MJ)	5228	5228	5228	5228	6446	6446	6446	6446
Energia obtida (MJ)	2248	2143	2494	2520	3029	3099	3052	3114
Rendimento (%)	29,3	28,0	32,6	32,9	39,6	40,5	39,8	40,7
Energia elétrica excedente (kWh)	63	34	131	139	280	299	287	304
Produção de álcool (L)	87	87	87	87	87	87	87	87

Fonte: [NETO, 2009].

Realiza-se também uma verificação teórica referente à eficiência energética da tecnologia de hidrólise do tipo Organosolv com ácido diluído na plataforma bioquímica. Aproveitando-se 70% do bagaço na saída do terno de moenda, obteve-se um incremento de 17% na produção de álcool, considerando-se o aproveitamento apenas das hexoses [DIAS, 2008]. Utilizando esses resultados, verifica-se um rendimento energético da ordem de 38%, valor menor do que a tecnologia BIG/GTCC, visto que não há o aproveitamento de pentoses e lignina. Entretanto, comprova-se que quando há a implantação de novas tecnologias, existe um ganho efetivo na eficiência energética.

5.3 Estudo de Caso

O estudo de caso realizado é da unidade industrial de Jataí – GO (figura 5.7/5.8) do grupo COSAN. Trata-se de uma planta industrial totalmente nova, cujo projeto iniciou em 2007, com partida da unidade em 2009. As principais características são:

- Capacidade de quatro milhões de toneladas de cana por ano;

- Projeto de expansão para oito milhões de toneladas de cana por ano;
- Capacidade de processamento de 21.000 t/dia;
- Capacidade de produção de 2.249 m³/dia de álcool hidratado;
- Produção de energia elétrica de 112,56 kWh/t de cana com produção excedente de 70 à 75%;
- Sistema de limpeza a seco;
- Extração através de difusor com nível de extração de 98%;
- Eficiência do tratamento de caldo - 99,81%;
- Eficiência da fermentação - 90%;
- Eficiência da destilaria - 99,5%;
- Consumo de vapor: 481,47 kg/t cana;
- Duas caldeiras de 225 t/h, 100bar e 530°C;
- Duas turbinas de contrapressão de 35 MW e uma turbina de condensação de 30 MW;
- Taxa de conversão do bagaço de 2,18 kg de vapor por kg de bagaço.

Figura 5-7 - Foto aérea da unidade de Jataí -GO [NETO, 2009].

Figura 5-8 - *Layout da área de processo - Planta industrial de Jataí - COSAN [NETO, 2009].*

O apêndice II demonstra o memorial de cálculo para a Usina de Jataí, considerando os cenários II, III e IV sem levar em conta a melhoria do consumo de vapor do processo. A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos nas simulações, para uma tonelada de cana processada.

Tabela 5-4 - Simulação de Cenários do Estudo de Caso

CARACTERÍSTICA	CENÁRIOS		
	II	III	IV
Energia de entrada (MJ)	5653	6465	6465
Energia obtida (MJ)	2696	3201	3396
Rendimento (%)	33,3	39,6	42,0
Energia elétrica excedente (kWh)	84	224	278
Produção de álcool (L)	102	102	102

Fonte: [NETO, 2009].

Pela análise dos resultados obtidos na Tabela 5.2, pode-se concluir que:

- A utilização de tecnologia de 2ª geração gera um aumento de 19 a 26% na eficiência energética do aproveitamento de cana-de-açúcar;
- Utilizando o cenário mais positivo, tem-se um excedente de energia para venda, comparado com o estado atual de 194 kWh por tonelada de cana. Em uma safra, haveria a possibilidade de gerar 776 GWh adicionais. Caso se considere que R\$150,00/MWh, ter-se-ia uma receita adicional de R\$117.000.000,00 por safra;
- Outra opção seria desativar apenas a turbina de condensação. A utilização do bagaço excedente e 50% da palha para produção de energia elétrica, resulta em um aumento de 140 kWh por tonelada de cana. Em uma safra haveria a possibilidade de gerar 560 GWh adicionais. Caso se considere que R\$150,00/MWh, ter-se-ia uma receita adicional de R\$84.000.000,00 por safra;

- Uma configuração possível de ampliação da planta seria aumentar a capacidade para 22500 t/dia de processamento de cana-de-açúcar, o que possibilitaria a utilização da capacidade total das caldeiras de vapor para atender o processo e realizar a instalação do sistema BIG/GTCC na área das caldeiras novas para o aproveitamento do bagaço excedente e 50% da palha. A Tabela 5.3 demonstra essa possibilidade, comparando com o plano de ampliação para 8 milhões de tonelada de cana por ano.

Tabela 5-5 - Tabela de comparação de uma ampliação de produção em 1ª geração e uma ampliação com a integração com tecnologia de 2ª geração

Produção por safra	Ampliações		
	Atual (4.000 kt/ ano)	A-I (4.285 kt/ ano)	A-II (8.000 kt/ ano)
Etanol (m ³)	408.000	437.129	612.000
Energia elétrica (GWh)	336	960	672
Receita (10 ⁶ R\$) por safra ⁽¹⁾⁽²⁾	409	529	825
Investimentos (10 ⁶ R\$)	-	328 ⁽³⁾⁽⁴⁾	600 ⁽⁵⁾
Custo operacional adicional da cana (10 ⁶ R\$)	-	21 ⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾	216 ⁽⁶⁾⁽⁸⁾
Taxa interna de retorno (20 anos)	-	30%	33%

Fonte: [NETO, 2009]. Notas: (1) Preço de venda do litro do álcool R\$0,88; (2) Preço de venda da energia elétrica; (3) Cotação do dólar = R\$2,00; (4) Custo da Tecnologia BIG/GT [HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005] considerado uma redução de custo 33% devido ao aumento de escala; (5) Custo de implantação de unidade de processamento de 1ª Geração R\$150,00 t / cana (6) Custo da tonelada de cana R\$43,80 [FARHAT, 2006]; (7) Custo do aproveitamento da palha (enfardamento) R\$17,75 [PICOLI, 2006]; (8) Custo operacional industrial estimado R\$10,00.

A tabela 5.3 demonstra que é possível aumentar a receita em 30% com um acréscimo de apenas 7% no canavial através da melhoria da eficiência, aproveitando totalmente as caldeiras já implantadas, referentes à tecnologia de 1ª geração. Ou seja, essa ampliação seria uma simbiose industrial, com risco minimizado na implantação e sem o custo agrícola. É válido ressaltar que esta

conclusão é preliminar, já que este estudo técnico-econômico é pertinente a trabalhos futuros. Em uma análise preliminar concluímos que taxa interna de retorno em 20 anos é 30% para A-I, contra 33% A-II; ou seja, dentro da precisão da análise realizada, deve ser avaliada a implantação de segunda geração ao invés da ampliação da unidade para oito milhões de tonelada.

A instalação poderia ser realizada na área destinada à ampliação de vapor e energia. Isso pode ser observado na figura 5.9, onde demonstramos a localização da tecnologia de 2ª geração. Além disso, a área ficaria ao lado do Pátio de Bagaço, reduzindo assim o custo com o transporte de bagaço e possibilitando que toda a área de ampliação seja separada da área industrial, diminuindo o risco de acidentes e possíveis paradas na área industrial da 1ª geração.

Figura 5-9 - Possível Área de implantação da tecnologia BIG/GTCC [NETO, 2009].

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, caracterizou-se o cenário energético mundial e nacional, que demonstra uma demanda crescente de energia, criando-se a necessidade de um melhor aproveitamento nas unidades "geradoras" de energia.

Esta dissertação visou demonstrar a eficiência energética das plantas industriais existentes de processamento de cana-de-açúcar, que utilizam tecnologias de 1ª geração, e sua melhoria quando implantadas novas tecnologias de conversão, chamadas de 2ª geração.

6.1 Conclusões

As plantas industriais existentes estão melhorando a sua eficiência energética através da mudança de caldeiras de baixa pressão para alta pressão e turbinas de contrapressão, não necessitando de aumento de matéria-prima, já que realiza um melhor aproveitamento do bagaço. Essa configuração está sendo considerada como o estado da arte em unidades de processamento de cana-de-açúcar e implantada na maioria dos novos projetos, pois possui uma melhoria de eficiência energética de 33% e produção de energia elétrica excedente de 80 kWh por tonelada de cana-de-açúcar, que é superior a 10% da tecnologia anterior.

As unidades existentes possuem duas formas principais de realizar uma melhoria na eficiência do seu processo, uma é a realização da redução do consumo de vapor [DIAS, 2008] e a outra é a utilização de tecnologias de 2ª geração. Esta dissertação demonstra que o acréscimo de energia, quando reduzido de consumo de vapor, é relativamente baixo, aproximadamente 2 a 5%. Diferentemente da utilização de novas tecnologias, que possui um aumento de eficiência, aproximadamente a 25%, o que eleva para outro patamar, superior a 39%, o aproveitamento energético da cana-de-açúcar.

O primeiro nível de integração de tecnologias de segunda geração em plantas existentes será através da utilização apenas do bagaço excedente e de 50% da palha. Essa configuração acrescenta apenas o custo de transporte da palha, visto que o bagaço já está na planta industrial. Além disso, reduz o risco de implantação da nova tecnologia, já que esta configuração é praticamente uma simbiose industrial,

pois a unidade de segunda geração ficará anexa à planta existente. Essa configuração obteve, nas simulações com a tecnologia BIG/GTCC, um rendimento energético de 40,5% com um excedente de energia elétrica de 299 kWh, quando realizada a redução do consumo de vapor.

O próximo passo é a integração completa da tecnologia de 2ª geração na unidade industrial existente, que deverá realizar o aproveitamento de todo o bagaço. Porém, é necessário que ela forneça o vapor para a produção de etanol da planta existente. Essa implantação resulta em uma mudança quase completa da área de produção de vapor e energia elétrica, alterando-se as caldeiras e as turbinas de condensação. Essa configuração obteve, nas simulações com a tecnologia BIG/GTCC, um rendimento energético de 40,7% com um excedente de energia elétrica de 304 kWh, quando realizada a redução do consumo de vapor.

Outro ponto a se ressaltar é que o aumento da eficiência energética possibilita um aumento de produção de energia elétrica e biocombustível, sem a necessidade de ampliação da área plantada de cana-de-açúcar, viabilizando assim um menor custo operacional e agrícola (plantações, maquinários, etc.). Por exemplo, no estudo de caso, a planta é de 4 milhões de toneladas de cana com previsão de ampliação para 8 milhões; porém, a mesma poderia realizar a implantação de tecnologia de 2ª geração, não necessitando de um aumento efetivo na área plantada.

Uma tendência, observada nas tecnologias de 2ª geração, é que a plataforma bioquímica seja a implantada em curto prazo. Porém, em médio prazo, a plataforma termoquímica deve superar a bioquímica, devido ao aproveitamento completo da matéria-prima, já que realiza o aproveitamento da lignina e dá flexibilidade na definição do produto final. O bio-óleo e/ou gás de síntese podem ser utilizados para a produção de energia elétrica, biocombustíveis e outros produtos.

6.2 Trabalhos Futuros

Este trabalho caracterizou a unidade de processamento de cana-de-açúcar atual e as principais tecnologias de segunda geração, possibilitando a realização de pesquisas futuras, que podem abordar os seguintes pontos:

- A realização de uma análise econômica da integração parcial da tecnologia BIG/GT e a integração completa em unidades de processamento de cana-de-açúcar existentes;
- Um estudo técnico-econômico comparativo entre a integração total ou parcial da tecnologia de segunda geração;
- Um estudo detalhado da integração de tecnologias de 2ª geração da plataforma bioquímica com plantas existentes, verificando qual a melhor configuração de fermentação;
- A realização de um estudo da utilização da vinhaça para o melhoramento do rendimento energético através da utilização de biodigestores;
- A realização de uma análise técnico-econômico da otimização energética de uma planta existente, através da redução do consumo de vapor, verificando se é viável o investimento de melhoria energética;
- A pesquisa da questão de alteração genética da cana-de-açúcar para aumentar a energia contida nessa matéria-prima, aumentando assim a energia de entrada na planta industrial [LEAL, 2007b];
- Pesquisar o impacto, no setor energético brasileiro, do aumento efetivo de produção de energia elétrica das unidades de processamento de cana-de-açúcar através da utilização de tecnologia de 2ª geração.

REFERÊNCIAS

ABENGOA. Saint Louis. **Processo de produção de etanol celulósico**. Disponível em: <<http://www.iogen.ca>>. Acesso em: 20 out. 2008.

ALMEIDA, M.; ROCHELLE, L. A.; CROCOMO, O. J. Chave Analítica para determinação de dez variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) **Scientia Agricola**, n. 52, 16-19 p., 1995.

BABU, S. P. Perspectives on Biomass Gasification. **Task 33: Thermal Gasification of Biomass**. IEA Bioenergy Agreement, Viena, 2006. Disponível em: <<http://www.ieabioenergy.com>>. Acesso em: 08 de mar. 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética**. Brasília: MME: EPE, 2007. 324 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Produção Brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, 01/08/2008. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 29 dez. 2008a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Relatório das Unidades Produtoras cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia**. Brasília, 24/12/2008. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 29 dez. 2008b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Produção Brasileira de Álcool**. Brasília, 01/08/2008. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 29 dez. 2008c.

BRITO, R.P. **Processo de destilação extrativa: modelagem dinâmica, simulação e avaliação de nova configuração**. 1997. 213 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

CARVALHO, E. P. Perspectivas da Agroenergia. **Seminário BM&F perspectivas para o Agribusiness em 2007 e 2008**. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/agronegocio>>. Acesso em 17 mai. 2008.

CEC. California Energy Commission. **Alcohol fuels from biomass - Assesment of production technologies**. CEC, 2007. 127 p.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol de cana-de-açúcar - Energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316p.

CHEN, J. C. P.; CHOU, CHUNG CHI. **Cane Sugar Handbook - A manual for cane sugar manufacturers and their Chemists**. 12th, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Ed.). **Biomassa para Energia**. Campinas: UNICAMP, 2008.

DIAS, M. O. S. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia excedentes do bagaço**. 2008. 282 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DUPONT, C. et. al. Biomass pyrolysis: Kinetic modelling and experimental validation under high temperature and flash heating rate conditions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2009.

EERE. Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington. **Base de dados de material celulósico**. Disponível em: <<http://www1.eere.energy.gov>>. Acesso em: 30 mar. 2008a.

EERE. Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington. **Plataforma Bioquímica**. Disponível em: <<http://www1.eere.energy.gov>>. Acesso em: 30 mar. 2008b.

EERE. Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington. **Plataforma Termoquímica**. Disponível em: <<http://www1.eere.energy.gov>>. Acesso em: 30 mar. 2008c.

ENGSTRÖM, F. Overview of power generation from biomass. In: **Gasification Technology Conference**, 1999, California. Disponível em: <<http://www.gasification.org>>. Acesso em: 23 out. 2008.

FAAIJ, A. P. C. Bio-energy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**, n. 34, p. 322-342, 2006.

FAO. Food and Agricultural Organization of the United Nations. **Base de Dados Produção Agrícola**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em 15 jul. 2008.

FARHAT, M. Colheita de cana-de-açúcar pelos fornecedores e prestadores de serviço. In: FAPESP. **Workshop do Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo: Colheita, Transporte e Recuperação de palha**. Campinas, 2006. Disponível em <<http://www.apta.sp.gov.br/cana/>> . Acesso em 16 set. 2008.

Gasification Technologies Council. Arlington. **Base de dados**. Disponível em: <<http://www.gasification.org>>. Acesso em: 20 out. 2008.

GRABOWSKI, P. **Biomass thermochemical conversion: OBP efforts**. Office of Biomass Program. Washington, 2004.

GRAINNET. Decatur. **Base de dados de plantas de etanol celulósico**. Disponível em: <<http://www.grainnet.com/pdf/cellulosemap.pdf>>. Acesso em 25 jan. 2009.

GOYAL, H. B.; SEAL, D.; SAXENA, R. C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 12, p. 504-517, 2008.

HAMELINCK, C. N.; HOOIJDONK, G. V.; FAAIJ, A. P. C. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. **Biomass and Bioenergy**, n. 28, p.384-410, 2005.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. (Ed.). **Biomass power generation - Sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, n.100, p. 10-18, 2009.

HUGOT, E. **Handbook of cane sugar engineering**, 3rd, Oxford: ELSEVIER, 1986.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Investment Outlook – 2006**. Paris: IEA Publications, 2006. 601 p.

INCOSE – **Internacional Council on Systems Engineering, Systems Engineering Handbook**. Version 2a. USA: INCOSE, 1st June, 2004.

IOGEN. Ottawa. **Processo de produção de etanol celulósico**. Disponível em: <<http://www.iogen.ca>>. Acesso em: 20 out. 2008.

ISAF. **17th International Symposium on Alcohol Fuels**. Taiyuan, 2008. Disponível em: <<http://isaf2008.tyut.edu.cn/>>. Acesso em 12 nov. 2008.

LARSON, E. D.; WILLIAMS, R. H.; LEAL, M. R. L. V. A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with analysis for Cuba. **Energy for Sustainable Development**, vol. V, n.1, 2001.

LASER, M. et. al. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. **Bioresource Technology**, n. 81, p. 33-44, 2002.

LEAL. M. R. L. V. Biocombustíveis - Cenários Globais, Demandas Futuras e Desafios Tecnológicos: Perspectivas e Tendências. In: Instituto Promon de Tecnologia. **Tecnologias para o Futuro da Produção do Etanol no Brasil**, 2007a, São Paulo. Disponível em <<http://www.itpromon.com.br>>. Acesso em dez. 2007.

LEAL. M. R. L. V. Cana de açúcar como fonte de energia. In: **Encontro Franco Brasileiro da cana de açúcar**, 2006, Brasília. Disponível em <<http://www.iar-pole.com>>. Acesso em nov. 2007.

LEAL. M. R. L. V. Energy Cane: What is it? What can be the measure or function to optimize. In: FAPESP. **Workshop do Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo: Cana energia**. Campinas, 2007b. Disponível em <<http://www.apta.sp.gov.br/cana/>> . Acesso em 20 set. 2008.

KAAR, W. E.; GUTIERREZ C. V.; KINOSHITA, C. M. Steam explosion of sugarcane bagasse as a pretreatment for conversion to ethanol. **Biomass and Bioenergy**, vol. 14, no. 3, p. 277-287, 1998.

KAM, B.; GRUBER, P. R.; KAMM, M. (Ed.). **Biorefineries – Industrial Process and Products – Status Quo and Future Directions**, Vol1. 1st, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KgaA, 2006.

KWANT, K. W.; KNOEF, H. **Status of Gasification in countries participating in the IEA and GasNet activity**. IEA Bioenergy, Agosto 2004.

MACEDO, I. C.; LEAL, M.R.L.V.; SILVA, J. E. A. R. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. Secretária do meio ambiente, Governo de São Paulo. 19 p. 2004.

MANTELATTO, P. E. **Estudo da cinética de cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

MARQUES, E. C. V. **A aplicação de novas tecnologias para produção de GNL no Brasil**. 2008. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEIRELLES, A. J. A. Expansão de produção e melhoria tecnológica da destilação alcoólica. In: FAPESP. **Workshop do Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo: Produção de etanol**. Lorena, 2006. Disponível em <<http://www.apta.sp.gov.br/cana/>> . Acesso em 20 fev. 2008.

MOSIER, N. et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Biomass Technology**, n. 96, p. 673-686, 2005.

MURPHY, J. D.; MCCARTHY, K. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. **Applied Energy**, n. 82, p. 148-166, 2005.

NETL. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh. **Base de dados de gaseificação**. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/database/database.html>>. Acesso em: 20 set. 2008.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. Golden. **Apresenta o conceito de Biorefinaria**. Disponível em : <<http://www.nrel.gov/biomass/>>. Acesso em: 11 jan. 2008.

OPET. Organisations for the Promotion of Energy Technologies. **Review of Finnish biomass gasification**. Disponível em: <<http://www.gastechnology.org>>. Acesso em: 20 jun. 2008.

PASQUINI, D. et al. Extraction of lignin from sugar cane bagasse and *Pinus taeda* wood chips using ethanol-water mixtures and carbon dioxide at high pressures. **The journal of Supercritical fluids**, n.36, p. 31-39, 2005.

PHILLIPS, S. **Thermochemical ethanol via indirect gasification and mixed alcohol synthesis of lignocellulosic biomass**. Golden: NREL Publications, 2007. 132 p.

REIINTERNATIONAL. **Informação da metodologia 5E**. Disponível em: <<http://www.reiinternational.org>>. Acesso em: 21 out. 2008.

RIPOLI, T. C. C. Palhão de cana: opção para cogeração? In: FAPESP. **Workshop do Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo: Colheita, Transporte e Recuperação de palha**. Campinas, 2006. Disponível em <<http://www.apta.sp.gov.br/cana/>> . Acesso em 16 set. 2008.

SÁNCHEZ, O. J.; CARDONA, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. **Bioresource Technology**, n.98, p. 5270-5295, 2008.

SCHMIDELL, W. et al. (Ed.). **Biotecnologia Industrial: Engenharia Bioquímica**. São Paulo: Edgar Blücher, 2001.

SCHUETZLE, D.; TAMBLYN, G. **An Assessment of Biomass Conversion Technologies and Recommendations in Support of the Deployment of a 450 Ton/Day integrated Biofuels and Energy Production (IBEP) Plant for the production of ethanol, electricity, and Heat from Rice Harvest Waste and other Agriculture Biomass Resources in Gridley**, California, 2007. DOE.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. 2008. 288 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SERMATEC. Sertãozinho. **Fotos de equipamentos**. Disponível em: <<http://www.sermatec.com.br>>. Acesso em: 20 mai. 2008.

SOUSA, M. F. B. **Separação e identificação dos constituintes do bagaço de cana e sua conversão em insumos químicos pelo processo "Organosolv"**. 1984. 117 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1984.

SOUZA, E. L. Ethanol: A sustainable alternative for transport. In: **World Future Energy Summit**, 2009, Abu Dhabi. Disponível em <<http://www.worldfutureenergysummit.com>>. Acesso em 05 fev. 2009.

SUN Y.; CHENG J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology**, n.83, p. 1-11, 2002.

VALERIANO, D. L. **Gerência em Projetos: Pesquisa, Desenvolvimento e Engenharia**. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1998.

WILLIAMS, R. H.; LARSON, E. D. Biomass gasifier gas turbine power generating technology. **Biomass and Bioenergy**, vol. 10, nos. 2-3, p. 149-166, 1996.

APÊNDICE I

O apêndice I mostra os cálculos e premissas utilizadas para obtenção da eficiência energética dos cenários informados no capítulo 5 deste trabalho.

1.1 Memorial de Cálculo - Cenário IA

	A	B	C	D
1	Memorial de cálculo - Cenário IA			
2				
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO, LEAL; SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO, LEAL; SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO, LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	=B7/0,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	2787,79	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2436,26	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	7660,05	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	5224,05	MJ / t	=B17+B18
22	PERDA (1)	2436,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[LIAS, 2008]
28	AÇÚCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	55,76	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	° BRX DO BAGAÇO	2,40	° BRX	=B33/B32*100
35	UNIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	=100-B35-B34
37	BAGAÇO (4)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇÚCAR EM (5)	150,57	kg / t cana	=B28*B31/100
40	CALDO MISTO (5)	977,23	kg / t cana	=1000+B38*10-B37
41				
42				
43	GERAÇÃO DE VAPOR			
44				
45	Pressão de Caldeira	100,00	bar	Premissa
46	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Premissa
47	Consumo de Vapor (7)	500,00	kg	[CGEE, 2008]
48	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ / kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
49	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ / kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
50	Eficiência da Caldeira	0,90		Premissa
51	Produção de vapor / kg de bagaço	2,83	kgv / kg bag	=1*(B53-B54)/(B55*B23*B41/100)
52	Consumo de Bagaço	176,41	kg / t cana	=B47/B51
53	Bagaço Excedente (3)	106,36	kg / t cana	=B37-B52
54	Energia referente ao Bagaço Excedente	916,38	MJ / t cana	=(B53*B36)/100*B14
55	Energia na saída da Caldeira (6)	1725,00	MJ / t cana	=B47*B48/1000
56	Perda de Energia referente a eficiência da Caldeira	40,82	MJ / t cana	=(B49*B47)/1000+(B52*(B36/100)*B14)-B55

	A	B	C	D
57	TURBO-GERADORES			
58				
59	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
60	Produção Energia Elétrica x vapor (Condensação)	0,00	kg / kWh	Neste cenário a demanda é do processo
61	Produção de Energia Elétrica	90,91	kWh	=B47/B59
62	Consumo de Energia Elétrica (6) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
63	Consumo de Energia Elétrica (7) - Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
64	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	62,91	kWh	=B61-SOMA(B62-B63)
65	Energia Elétrica Produzida	327,27	MJ / t cana	=B61*3,6
66	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
67	Energia contida no vapor de processo	1085,00	MJ	=B47*B66
68	Perda nos Turbo-geradores	312,73	MJ	=B55-B67-B66
69				
70				
71	PRODUÇÃO DE ETANOL			
72				
73	Entrada de açúcar no Caldo Misto	150,57	kg / t cana	=B39
74	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO, LEAL, SILVA, 2004]
75	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
76	Eficiência da Destilaria	99,80	%	[CGEE, 2008]
77	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	
78	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	
79				
80				
81	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
82				
83	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	62,91	kWh	=B64
84	Produção de Etanol (10)	86,78	L	=B78
85	Energia - Energia elétrica excedente	226,47	MJ	=3,6*B83
86	Energia - Etanol	2021,13	MJ	=23,29*B84
87	Energia total produzida	2247,60	MJ	=SOMA(B85:B86)
88	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	29,34%	%	=B87/B20
89	Rendimento da energia da planta industrial	43,02%	%	=B87/B21

Figura I - 1 -Memorial de cálculo: Cenário I(A)

I.2 Memorial de Cálculo - Cenário IB

	A	B	C	D
1	Memorial de cálculo - Cenário IB			
2				
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	= B7/D,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	= B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	2787,79	MJ / t	= B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2436,26	MJ / t	= B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	= B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	7660,05	MJ / t	= SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	5224,05	MJ / t	= B17+B18
22	PERDA (1)	2436,00	MJ / t	= B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[DIAS, 2008]
28	AÇÚCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	= B28*B16+B18
30	PERDA (2)	55,76	MJ / t	= B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	° BRX DO BAGAÇO	2,40	° BRX	= B33/B32*100
35	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	= 100-B35-B34
37	BAGAÇO (4)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇÚCAR EM (5)	150,57	kg / t cana	= B28*B31/100
40	CALDO MISTO (5)	977,23	kg / t cana	= 1000+B38*10-B37
41				
42				
43	GERAÇÃO DE VAPOR			
44				
45	Pressão da Caldeira	100,00	bar	Premissa
46	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Premissa
47	Consumo de Vapor (7)	340,00	kg	[CGEE, 2008]
48	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ / kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
49	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ / kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
50	Eficiência da Caldeira	0,90		Premissa
51	Produção de vapor / kg de bagaço	2,83	kgv / kg bag	= 1*(B53-B54)/(B55*B23*B41/100)
52	Consumo de Bagaço	119,96	kg / t cana	= B47/B51
53	Bagaço Excedente (3)	162,81	kg / t cana	= B37-B52
54	Energia referente ao Bagaço Excedente	1402,74	MJ / t cana	=(B53*B36/100)*B14
55	Energia na saída da Caldeira (6)	1173,00	MJ / t cana	= B47*B48/1000
56	Perda de Energia referente a eficiência da Caldeira	27,75	MJ / t cana	=(B49*B47/1000)+(B52*(B36/100)*B14)-B55

	A	B	C	D
57	TURBO-GERADORES			
58				
59	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
60	Produção Energia Elétrica x vapor (Condensação)	0,00	kg / kWh	Neste cenário a demanda é do processo
61	Produção de Energia Elétrica	61,82	kWh	= B47/B59
62	Consumo de Energia Elétrica (6) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
63	Consumo de Energia Elétrica (7) - Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
64	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	33,82	kWh	= B61-SOMA(B62:B63)
65	Energia Elétrica Produzida	222,55	MJ / t cana	= B61*3,6
66	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
67	Energia contida no vapor de processo	737,80	MJ	= B47*B66
68	Perda nos Turbo-geradores	212,65	MJ	= B55-B67-B65
69				
70				
71	PRODUÇÃO DE ETANOL			
72				
73	Entrada de açúcar no Caldo Mistio	150,57	kg / t cana	= B39
74	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
75	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
76	Eficiência da Destilaria	99,80	%	[CGEE, 2008]
77	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	
78	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	
79				
80				
81	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
82				
83	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	33,82	kWh	= B64
84	Produção de Etanol (10)	86,78	L	= B78
85	Energia - Energia elétrica excedente	121,75	MJ	= 3,6*B83
86	Energia - Etanol	2021,13	MJ	= 23,29*B84
87	Energia total produzida	2142,87	MJ	= SOMA(B85:B86)
88	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	27,97%	%	= B87/B20
89	Rendimento da energia da planta industrial	41,02%	%	= B87/B21

Figura I - 2 -Memorial de cálculo: Cenário I (B)

I.3 Memorial de Cálculo - Cenário IIA

	A	B	C	D
1	Memorial de cálculo - Cenário IIA			
2				
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	=B7/D,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇUCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇUCAR DA CANA DE AÇUCAR	2787,79	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇUCAR	2436,26	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇUCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇUCAR (EP)	7660,05	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	5224,05	MJ / t	=B17+B18
22	PERDA (1)	2436,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[DIAS, 2008]
28	AÇUCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	55,76	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	° BRUX DO BAGAÇO	2,40	° BRUX	=B33/B32*100
35	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	=100-B35-B34
37	BAGAÇO (3)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇUCAR EM (4)	150,57	kg / t cana	=B28*B31/100
40	CALDO MISTO (4)	977,23	kg / t cana	=1000+B38*10-B37
41				
42				
43	GERAÇÃO DE VAPOR			
44				
45	Pressão de Caldeira	100,00	kgf/cm ² g	Premissa
46	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Premissa
47	Consumo de Vapor (7)	500,00	kg	[CGEE, 2008]
48	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ/ kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
49	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ/ kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
50	Eficiência da Caldeira	0,90		Premissa
51	Produção de vapor/ kg de bagaço	2,83	kgv / kg bag	=1*(B48-B49)/(B50*B18*B36/100)
52	Consumo de Bagaço	176,41	kg / t cana	=B47/B51
53	Bagaço Excedente	106,36	kg / t cana	=B37-B52
54	Energia referente ao Bagaço Excedente	916,38	MJ/ t cana	=((B53*B36)/100)*B14
55	Produção de vapor para Turbina condensação (5)	301,46	kg / t cana	=B53*B51
56	Energia na saída da Caldeira	1725,00	MJ/ t cana	=B47*B48/1000
57	Perda de Energia referente a eficiência da Caldeira	40,82	MJ/ t cana	=((B49*B47)/1000)+(B52*(B36/100)*B14)-B56
58				
59				

	A	B	C	D
60	TURBO-GERADORES (CONTRAPRESSÃO)			
61				
62	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
63	Produção de Energia Elétrica	90,91	kWh	=B47/B62
64	Consumo de Energia Elétrica (9) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
65	Consumo de Energia Elétrica (7) -Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
66	Produção de Energia Elétrica Excedente (8)	62,91	kWh	=B63-SOMA(B64:B65)
67	Energia Elétrica Produzida	327,27	MJ / t cana	=B63*3,6
68	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
69	Energia contida no vapor de processo	1085,00	MJ	=B47*B68
70	Perda nos Turbo-geradores	312,73	MJ	=B56-B69-B67
71				
72				
73	TURBO-GERADORES (CONDENSAÇÃO)			
74				
75	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	4,40	kg / kWh	Premissa
76	Produção de Energia Elétrica	68,51	kWh	=B55/B75
77	Energia Elétrica Produzida	246,65	MJ / t cana	=B76*3,6
78	Perda nos Turbo-geradores	793,39	MJ	=B48*B55/1000-B77
79				
80				
81	PRODUÇÃO DE ETANOL			
82				
83	Entrada de açúcar no Caldo Misto	150,57	kg / t cana	=B44
84	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
85	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
86	Eficiência da Destilaria	99,80	%	[CGEE, 2008]
87	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	=B83*0,511*B86*B85*B84/100/100/100
88	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	=B87/0,79
89				
90				
91	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
92				
93	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	131,42	kWh	=B66+B76
94	Produção de Etanol	86,78	L	=B88
95	Energia - Energia elétrica excedente	473,12	MJ	=3,6*B93
96	Energia - Etanol	2021,13	MJ	=23,29*B94
97	Energia total produzida	2494,25	MJ	=SOMA(B95:B96)
98	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	32,56%	%	=B97/B20
99	Rendimento da energia da planta industrial	47,75%	%	=B97/B21

Figura I - 3 -Memorial de cálculo: Cenário II (A)

I.4 Memorial de Cálculo - Cenário IIB

	A	B	C	D
1				
2	Memorial de cálculo - Cenário IIB			
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO, LEAL, SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO, LEAL, SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO, LEAL, SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	=B7/0,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI, LEAL, MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGAÇO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI, LEAL, MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI, LEAL, MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	2787,79	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2436,26	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	7660,05	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	5224,05	MJ / t	=B17+B18
22	PERDA (1)	2436,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[DIAS, 2008]
28	AÇÚCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	55,76	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	° BRIX DO BAGAÇO	2,40	° BRIX	=B33/B32*100
35	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	=100-B35-B34
37	BAGAÇO (3)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇÚCAR EM (4)	150,57	kg / t cana	=B28*B31/100
40	CALDO MISTO (4)	977,23	kg / t cana	=1000+B38*10-B37
41				
42				
43	GERAÇÃO DE VAPOR			
44				
45	Pressão de Caldeira	100,00	kgf/cm ² g	Premissa
46	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Premissa
47	Consumo de Vapor (7)	340,00	kg	[CGEE, 2008]
48	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ / kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
49	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ / kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
50	Eficiência da Caldeira	0,90		Premissa
51	Produção de vapor / kg de bagaço	2,83	kgv / kg bag	=1*(B48-B49)/(B50*B18*B36/100)
52	Consumo de Bagaço	119,96	kg / t cana	=B47/B51
53	Bagaço Excedente	162,81	kg / t cana	=B37-B52
54	Energia referente ao Bagaço Excedente	1402,74	MJ / t cana	=((B53*B36)/100)*B14
55	Produção de vapor para Turbina condensação (5)	461,46	kg / t cana	=B53*B51
56	Energia na saída da Caldeira	1173,00	MJ / t cana	=B47*B48/1000
57	Perda de Energia referente a eficiência da Caldeira	27,75	MJ / t cana	=((B49*B47)/1000)+(B52*(B36/100)*B14)-B56
58				
59				

	A	B	C	D
60	TURBO-GERADORES (CONTRAPRESSÃO)			
61				
62	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
63	Produção de Energia Elétrica	61,82	kWh	=B47/B62
64	Consumo de Energia Elétrica (9) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
65	Consumo de Energia Elétrica (7) -Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
66	Produção de Energia Elétrica Excedente (8)	33,82	kWh	=B63-SOMA(B64:B65)
67	Energia Elétrica Produzida	222,55	MJ / t cana	=B63*3,6
68	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
69	Energia contida no vapor de processo	737,60	MJ	=B47*B68
70	Perda nos Turbo-geradores	212,65	MJ	=B56-B69-B67
71				
72				
73	TURBO-GERADORES (CONDENSAÇÃO)			
74				
75	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	4,40	kg / kWh	Premissa
76	Produção de Energia Elétrica	104,88	kWh	=B55/B75
77	Energia Elétrica Produzida	377,56	MJ / t cana	=B76*3,6
78	Perda nos Turbo-geradores	1214,49	MJ	=B48*B55/1000-B77
79				
80				
81	PRODUÇÃO DE ETANOL			
82				
83	Entrada de açúcar no Caldo Misto	150,57	kg / t cana	=B44
84	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO, LEAL, SILVA, 2004]
85	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
86	Eficiência da Destilaria	99,80	%	[CGEE, 2008]
87	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	=B83*0,511*B86*B85*B84/100/100/100
88	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	=B87/0,79
89				
90				
91	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
92				
93	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	138,70	kWh	=B66+B76
94	Produção de Etanol	86,78	L	=B88
95	Energia - Energia elétrica excedente	499,31	MJ	=3,6*B93
96	Energia - Etanol	2021,13	MJ	=23,29*B94
97	Energia total produzida	2520,43	MJ	=SOMA(B95:B96)
98	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	32,90%	%	=B97/B20
99	Rendimento da energia da planta industrial	48,25%	%	=B97/B21

Figura I - 4 -Memorial de cálculo: Cenário II (B)

I.5 Memorial de Cálculo - Cenário IIIA

	A	B	C	D
1	Memorial de cálculo - Cenário IIIA			
2				
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	=B7/0,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	2787,79	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2436,26	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	7660,05	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	6442,05	MJ / t	=B17+B18+B19*0,5
22	PERDA (1)	1218,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[DIAS, 2008]
28	AÇÚCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	1273,76	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	* BRUX DO BAGAÇO	2,40	* BRUX	=B33/B32*100
35	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	=100-B35-B34
37	BAGAÇO (3)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇÚCAR EM (4)	150,57	kg / t cana	=B28*B31/100
40	CALDO MISTO (4)	977,23	kg / t cana	=1000+B38*10-B37
41				
42				
43	GERAÇÃO DE VAPOR			
44				
45	Pressão de Caldeira	100,00	bar	Premissa
46	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Premissa
47	Consumo de Vapor (7)	500,00	kg	[CGEE, 2008]
48	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ / kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
49	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ / kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
50	Eficiência da Caldeira	0,90		Premissa
51	Produção de vapor / kg de bagaço	2,83	kgv / kg bag	=1*(B53-B54)/(B55*B23*B41/100)
52	Consumo de Bagaço	176,41	kg / t cana	=B47/B51
53	Bagaço Excedente (3)	106,36	kg / t cana	=B37-B52
54	Energia referente ao Bagaço Excedente	916,38	MJ / t cana	=(B53*B36/100)*B14
55	Energia na saída da Caldeira (6)	1725,00	MJ / t cana	=B47*B48/1000
56	Perda de Energia referente a eficiência da Caldeira	40,82	MJ / t cana	=(B49*B47/1000)+(B52*(B36/100)*B14)-B55
57				
58				
59	TURBO-GERADORES			
60				
61	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
62	Produção Energia Elétrica x vapor (Condensação)	0,00	kg / kWh	
63	Produção de Energia Elétrica	90,91	kWh	=B47/B61
64	Consumo de Energia Elétrica (6) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
65	Consumo de Energia Elétrica (7) - Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
66	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	62,91	kWh	=B63-SOMA(B64:B65)
67	Energia Elétrica Produzida	327,27	MJ / t cana	=B63*3,6
68	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 125°C)
69	Energia contida no vapor de processo	1085,00	MJ	=B47*B68
70	Perda nos Turbo-geradores	312,73	MJ	=B55-B69-B67
71				
72				

	A	B	C	D
73	PRODUÇÃO DE ETANOL			
74				
75	Entrada de açúcar no Caldo Misto	150,57	kg / t cana	=B44
76	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
77	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
78	Eficiência da Destilaria	99,80	%	[CGEE, 2008]
79	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	=B75*0,511*B78*B77*B76/100/100/100
80	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	=B79/0,79
81				
82				
83	TECNOLOGIA BIG-GT			
84				
85	Bagaco a ser gaseificado	106,36	kg / t cana	=B53
86	Palha a ser gaseificada	70,00	kg / t cana	=B13
87	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	1,80	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
88	Energia Elétrica Produzida	217,13	kWh/t cana	=(B85*B35/100)+B86)*B87
89	Energia BIG-GT	781,67	MJ / t cana	=B88*3,6
90	Perdas BIG-GT	1708,03	MJ / t cana	=(B84*B35/100)*B13+B85*B14-B88
91				
92				
93	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
94				
95	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	280,04	kWh	=B66+B88
96	Produção de Etanol	86,78	L	=B80
97	Energia - Energia elétrica excedente	1008,15	MJ / t cana	=3,6*B95
98	Energia - Etanol	2021,13	MJ / t cana	=23,29*B96
99	Energia total produzida	3029,27	MJ / t cana	=SOMA(B97:B98)
100	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	39,55%	%	=B99/B20
101	Rendimento da energia da planta industrial	47,02%	%	=B99/B21

Figura I - 5 -Memorial de cálculo: Cenário III (A)

I.6 Memorial de Cálculo - Cenário IIIB

	A	B	C	D
1				
2	Memorial de cálculo - Cenário IIIB			
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	=B7/0,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	2787,79	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2436,26	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	7660,05	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	6442,05	MJ / t	=B17+B18+B19*0,5
22	PERDA (1)	1218,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[DIAS, 2008]
28	AÇÚCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	1273,76	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	° BRIX DO BAGAÇO	2,40	° BRIX	=B33/B32*100
35	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	=100-B35-B34
37	BAGAÇO (3)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇÚCAR EM (4)	150,57	kg / t cana	=B28*B31/100
40	CALDO MISTO (4)	977,23	kg / t cana	=1000+B38*10-B37
41				
42				
43	GERAÇÃO DE VAPOR			
44				
45	Pressão de Caldeira	100,00	bar	Premissa
46	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Premissa
47	Consumo de Vapor (7)	340,00	kg	[CGEE, 2008]
48	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ / kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
49	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ / kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
50	Eficiência da Caldeira	0,90		Premissa
51	Produção de vapor / kg de bagaço	2,83	kgv / kg bag	=1*(B53-B54)/(B55*B23*B41/100)
52	Consumo de Bagaço	119,96	kg / t cana	=B47/B51
53	Bagaço Excedente (3)	162,81	kg / t cana	=B37-B52
54	Energia referente ao Bagaço Excedente	1402,74	MJ / t cana	=(B53*B36/100)*B14
55	Energia na saída da Caldeira (6)	1173,00	MJ / t cana	=B47*B48/1000
56	Perda de Energia referente a eficiência da Caldeira	27,75	MJ / t cana	=(B49*B47/1000)+(B52*(B36/100)*B14)-B55
57				
58				
59	TURBO-GERADORES			
60				
61	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
62	Produção Energia Elétrica x vapor (Condensação)	0,00	kg / kWh	
63	Produção de Energia Elétrica	61,82	kWh	=B47/B61
64	Consumo de Energia Elétrica (6) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
65	Consumo de Energia Elétrica (7) - Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
66	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	33,82	kWh	=B63-SOMA(B64:B65)
67	Energia Elétrica Produzida	222,55	MJ / t cana	=B63*3,6
68	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
69	Energia contida no vapor de processo	737,80	MJ	=B47*B68
70	Perda nos Turbo-geradores	212,65	MJ	=B55-B69-B67
71				
72				

	A	B	C	D
73	PRODUÇÃO DE ETANOL			
74				
75	Entrada de açúcar no Caldo Misto	150,57	kg / t cana	=B44
76	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
77	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
78	Eficiência da Destilaria	99,80	%	[CGEE, 2008]
79	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	=B75*0,511*B78*B77*B76/100/100/100
80	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	=B79/0,79
81				
82				
83	TECNOLOGIA BIG-GT			
84				
85	Bagaco a ser gaseificado	162,81	kg / t cana	=B53
86	Palha a ser gaseificada	70,00	kg / t cana	=B13
87	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	1,80	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
88	Energia Elétrica Produzida	265,50	kWh/t cana	=(B85*B36/100)+B86)*B87
89	Energia BIG-GT	955,80	MJ / t cana	=B88*3,6
90	Perdas BIG-GT	2681,43	MJ / t cana	=(B84*B35/100)*B13+B85*B14-B88
91				
92				
93	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
94				
95	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	299,32	kWh	=B66+B88
96	Produção de Etanol	86,78	L	=B80
97	Energia - Energia elétrica excedente	1077,54	MJ / t cana	=3,6*B95
98	Energia - Etanol	2021,13	MJ / t cana	=23,29*B96
99	Energia total produzida	3098,67	MJ / t cana	=SOMA(B97:B98)
100	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	40,45%	%	=B99/B20
101	Rendimento da energia da planta industrial	48,10%	%	=B99/B21

Figura I - 6 -Memorial de cálculo: Cenário III (B)

1.7 Memorial de Cálculo - Cenário IVA

	A	B	C	D
1				
2	Memorial de cálculo - Cenário IVA			
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO, LEAL; SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO, LEAL; SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO, LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	=B7/0,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	2787,79	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2436,26	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	7660,05	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	6442,05	MJ / t	=B17+B18+B19*0,5
22	PERDA (1)	1218,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[DIAS, 2008]
28	AÇÚCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	1273,76	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	° BRIX DO BAGAÇO	2,40	° BRIX	=B33/B32*100
35	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	=100-B35-B34
37	BAGAÇO (3)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇÚCAR EM (4)	150,57	kg / t cana	=B28*B31/100
40	CALDO MISTO (4)	977,23	kg / t cana	=1000*B38*10-B37
41				
42				
43	PRODUÇÃO DE ETANOL			
44				
45	Entrada de açúcar no Caldo Misto	150,57	kg / t cana	=B39
46	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO, LEAL; SILVA, 2004]
47	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
48	Eficiência da Destilação	99,80	%	[CGEE, 2008]
49	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	=B45*0,511*B48*B47*B46/100/100/100
50	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	=B49/0,79
51				
52				
53	TURBO-GERADORES			
54				
55	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
56	Produção de Energia Elétrica	90,91	kWh	=B71/B55
57	Consumo de Energia Elétrica (6) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
58	Consumo de Energia Elétrica (7) - Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
59	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	62,91	kWh	=B56-SOMA(B57:B58)
60	Energia Elétrica Produzida	327,27	MJ / t cana	=B56*3,6
61				
62				

	A	B	C	D
63	TECNOLOGIA BIG-GT			
64				
65	Bagaco a ser gaseificado	282,77	kg / t cana	=B37
66	Palha a ser gaseificada	70,00	kg / t cana	=B13
67	Demanda de vapor de processo	500,00	kg / t cana	
68	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	0,91	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
69	Taxa de produção de vapor	3,07	kgv / kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
70	Consumo de Biomassa para o vapor de processo	162,87	kg / t cana	=B67/B69
71	Produção de Vapor para processo	500,00	kgv / t cana	=B70*3,07
72	Produção de Energia Elétrica	148,21	kWh/t cana	=B70*B68
73	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	1,80	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
74	Energia Elétrica Produzida	75,12	kWh/t cana	=((B65*B36/100)+B66-B70)*B73
75	Energia BIG-GT	270,43	MJ / t cana	=B74*3,6
76				
77				
78	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
79				
80	Produção de Energia Elétrica Excedente (7)	286,24	kWh	=B74+B72+B59
81	Produção de Etanol	86,78	L	=B50
82	Energia - Energia elétrica excedente	1030,46	MJ / t cana	=3,6*B80
83	Energia - Etanol	2021,13	MJ / t cana	=23,29*B81
84	Energia total produzida	3051,58	MJ / t cana	=SOMA(B82-B83)
85	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	39,84%	%	=B84/B20
86	Rendimento da energia da planta industrial	47,37%	%	=B84/B21

Figura I - 7 -Memorial de cálculo: Cenário IV (A)

I.8 Memorial de Cálculo - Cenário IVB

	A	B	C	D
1	Memorial de cálculo - Cenário IVB			
2				
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	POL	14,53	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
8	Fibra	13,46	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
9	AR	0,55	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	15,84	%	=B7/0,95+B9
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	2787,79	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2436,26	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	7660,05	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	6442,05	MJ / t	=B17+B18+B19*0,5
22	PERDA (1)	1218,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	[DIAS, 2008]
28	AÇÚCAR NO (PE)	155,23	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5168,30	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	1273,76	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	97,00	%	[CGEE, 2008]
32	PUREZA DO CALDO DE ÚLTIMA PRESSÃO	70,00	%	Premissa
33	POL NO BAGAÇO	1,68		Premissa
34	° BRIX DO BAGAÇO	2,40	° BRIX	=B33/B32*100
35	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Premissa
36	PERCENTUAL DE FIBRA DO BAGAÇO	47,60	%	=100-B35-B34
37	BAGAÇO (3)	282,77	kg / t cana	=(B8*10)/(B36/100)
38	EMBEBIÇÃO	26,00	%	Premissa
39	AÇÚCAR EM (4)	150,57	kg / t cana	=B28*B31/100
40	CALDO MISTO (4)	977,23	kg / t cana	=1000+B38*10-B37
41				
42				
43	PRODUÇÃO DE ETANOL			
44				
45	Entrada de açúcar no Caldo Misto	150,57	kg / t cana	=B39
46	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,20	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
47	Eficiência na Fermentação	90,00	%	[CGEE, 2008]
48	Eficiência da Destilação	99,80	%	[CGEE, 2008]
49	Produção de Etanol	68,56	kg / t cana	=B45*0,511*B48*B47*B46/100/100/100
50	Produção de Etanol	86,78	L / t cana	=B49/0,79
51				
52				
53	TURBO-GERADORES			
54				
55	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	5,50	kg / kWh	Premissa
56	Produção de Energia Elétrica	61,82	kWh	=B71/B55
57	Consumo de Energia Elétrica (6) - Extração	16,00	kWh	[CGEE, 2008]
58	Consumo de Energia Elétrica (7) - Produção	12,00	kWh	[CGEE, 2008]
59	Produção de Energia Elétrica Excedente (9)	33,82	kWh	=B56-SOMA(B57:B58)
60	Energia Elétrica Produzida	222,55	MJ / t cana	=B56*3,6
61				
62				

	A	B	C	D
63	TECNOLOGIA BIG-GT			
64				
65	Bagço a ser gasificado	282,77	kg / t cana	=B37
66	Palha a ser gasificada	70,00	kg / t cana	=B13
67	Demanda de vapor de processo	340,00	kg / t cana	
68	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	0,91	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
69	Taxa de produção de vapor	3,07	kgv / kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
70	Consumo de Biomassa para o vapor de processo	110,75	kg / t cana	=B67/B69
71	Produção de Vapor para processo	340,00	kgv / t cana	=B70*3,07
72	Produção de Energia Elétrica	100,78	kWh/t cana	=B70*B68
73	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	1,80	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
74	Energia Elétrica Produzida	168,93	kWh/t cana	=((B65*B36/100)+B66-B70)*B73
75	Energia BIG-GT	608,15	MJ / t cana	=B74*3,6
76				
77				
78	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
79				
80	Produção de Energia Elétrica Excedente (7)	303,53	kWh	=B74+B72+B59
81	Produção de Etanol	86,78	L	=B50
82	Energia - Energia elétrica excedente	1092,71	MJ / t cana	=3,6*B80
83	Energia - Etanol	2021,13	MJ / t cana	=23,29*B81
84	Energia total produzida	3113,84	MJ / t cana	=SOMA(B82-B83)
85	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	40,65%	%	=B84/B20
86	Rendimento da energia da planta industrial	48,34%	%	=B84/B21

Figura I - 8 -Memorial de cálculo: Cenário IV (B)

APÊNDICE II

O apêndice II apresenta os cálculos e as premissas utilizadas para obtenção da eficiência energética do estudo de caso informados no capítulo 5 deste trabalho.

II.1 Memorial de Cálculo - Estudo de Caso II

	A	B	C	D
1				
2	Estudo de Caso - Cenário II			
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	PCC	17,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
8	Fibra	13,30	%	Dados disponibilizados pela COSAN
9	AR	0,55	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	18,44	%	Dados disponibilizados pela COSAN
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	3245,39	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2407,30	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	8088,69	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	5652,69	MJ / t	=B17+B18
22	PERDA (1)	2436,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	0,50	%	Sistema de limpeza a seco
28	AÇÚCAR NO (PE)	183,48	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5636,47	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	16,23	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	98,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
32	POL NO BAGAÇO	1,23		Dados disponibilizados pela COSAN
33	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
34	BAGAÇO (3)	275,71	kg / t cana	Dados disponibilizados pela COSAN
35	AÇÚCAR EM (4)	179,81	kg / t cana	=B28*B31/100
36				
37				
38	GERAÇÃO DE VAPOR			
39				
40	Pressão de Caldeira	100,00	kgf/cm ² g	Dados disponibilizados pela COSAN
41	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Dados disponibilizados pela COSAN
42	Consumo de Vapor (7)	481,47	kg	Dados disponibilizados pela COSAN
43	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ/ kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
44	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ/ kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
45	Produção de vapor/ kg de bagaço	2,18	kgv / kg bag	Dados disponibilizados pela COSAN
46	Consumo de Bagaço	220,86	kg / t cana	=B42/B45
47	Bagaço Excedente	54,85	kg / t cana	=B34-B46
48	Produção de vapor para Turbina condensação (5)	119,58	kg / t cana	=B47*B45
49	Energia na saída da Caldeira	2073,61	MJ/ t cana	=(B42*B43/1000)+B48*B43/1000
50				
51				
52	TURBO-GERADORES (CONTRAPRESSÃO)			
53				
54	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	6,06	kg / kWh	Dados disponibilizados pela COSAN
55	Produção de Energia Elétrica	79,45	kWh	=B42/B54
56	Consumo de Energia Elétrica	29,83	kWh	Dados disponibilizados pela COSAN
57	Produção de Energia Elétrica Excedente (8)	49,62	kWh	=B55-B56
58	Energia Elétrica Produzida	286,02	MJ / t cana	=B55*3,6
59	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
60	Energia contida no vapor de processo	1044,79	MJ	=B42*B59
61				
62				

	A	B	C	D
63	TURBO-GERADORES (CONDENSAÇÃO)			
64				
65	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	3,52	kg / kWh	Dados disponibilizados pela COSAN
66	Produção de Energia Elétrica	33,97	kWh	=B48/B65
67	Energia Elétrica Produzida	122,30	MJ / t cana	=B66*3,6
68	Perda nos Turbo-geradores	290,25	MJ	=B43*B48/1000-B67
69				
70				
71	PRODUÇÃO DE ETANOL			
72				
73	Entrada de açúcar no Caldo Misto	177,90	kg / t cana	Dados disponibilizados pela COSAN
74	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,81	%	Dados disponibilizados pela COSAN
75	Eficiência na Fermentação	90,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
76	Eficiência da Destilaria	99,50	%	Dados disponibilizados pela COSAN
77	Produção de Etanol	81,25	kg / t cana	=B73*0,511*B76*B75*B74/100/100/100
78	Produção de Etanol	102,85	L / t cana	=B77/0,79 -Confirmado - dados da COSAN
79				
80				
81	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
82				
83	Produção de Energia Elétrica Excedente	83,59	kWh	=B57+B66 Confirmado - dados da COSAN
84	Produção de Etanol	102,85	L	=B78
85	Energia - Energia elétrica excedente	300,93	MJ	=3,6*B83
86	Energia - Etanol	2395,40	MJ	=23,29*B84
87	Energia total produzida	2696,33	MJ	=SOMA(B85:B86)
88	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	33,33%	%	=B87/B20
89	Rendimento da energia da planta industrial	47,70%	%	=B87/B21

Figura II - 1 - Memorial de Cálculo: Estudo de Caso II

II.2 Memorial de Cálculo - Estudo de Caso III

	A	B	C	D
1	Estudo de Caso - Cenário III			
2				
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	PCC	17,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
8	Fibra	13,30	%	Dados disponibilizados pela COSAN
9	AR	0,55	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	18,44	%	Dados disponibilizados pela COSAN
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	3245,39	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2407,30	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	8088,69	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	6464,69	MJ / t	=B17+B18+B22*0,5
22	PERDA (1)	1624,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	0,50	%	Sistema de limpeza a seco
28	AÇÚCAR NO (PE)	183,48	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5636,47	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	828,23	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	98,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
32	POL NO BAGAÇO	1,23		Dados disponibilizados pela COSAN
33	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
34	BAGAÇO (3)	275,71	kg / t cana	Dados disponibilizados pela COSAN
35	AÇÚCAR EM (4)	179,81	kg / t cana	=B28*B31/100
36				
37				
38	GERAÇÃO DE VAPOR			
39				
40	Pressão de Caldeira	100,00	kgf/cm ² g	Dados disponibilizados pela COSAN
41	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Dados disponibilizados pela COSAN
42	Consumo de Vapor (7)	481,47	kg	Dados disponibilizados pela COSAN
43	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ / kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
44	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ / kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
45	Produção de vapor/ kg de bagaço	2,18	kgv / kg bag	Dados disponibilizados pela COSAN
46	Consumo de Bagaço	220,86	kg / t cana	=B42/B45
47	Bagaço Excedente	54,85	kg / t cana	=B34-B46
48				
49				
50	TURBO-GERADORES (CONTRAPRESSÃO)			
51				
52	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	6,06	kg / kWh	Dados disponibilizados pela COSAN
53	Produção de Energia Elétrica	79,45	kWh	=B42/B52
54	Consumo de Energia Elétrica	29,83	kWh	Dados disponibilizados pela COSAN
55	Produção de Energia Elétrica Excedente (8)	49,62	kWh	=B53-B54
56	Energia Elétrica Produzida	286,02	MJ / t cana	=B53*3,6
57	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
58	Energia contida no vapor de processo	1044,79	MJ	=B42*B57
59				
60				

	A	B	C	D
61	PRODUÇÃO DE ETANOL			
62				
63	Entrada de açúcar no Caldo Misto	177,90	kg / t cana	Dados disponibilizados pela COSAN
64	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,81	%	Dados disponibilizados pela COSAN
65	Eficiência na Fermentação	90,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
66	Eficiência da Destilaria	99,50	%	Dados disponibilizados pela COSAN
67	Produção de Etanol	81,25	kg / t cana	=B63*0,511*B66*B65*B64/100/100/100
68	Produção de Etanol	102,85	L / t cana	=B67/0,79 -Confirmado - dados da COSAN
69				
70				
71	TECNOLOGIA BIG-GT			
72				
73	Bagaco a ser gaseificado	54,85	kg / t cana	=B47
74	Palha a ser gaseificada	70,00	kg / t cana	=B19
75	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	1,80	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
76	Energia Elétrica Produzida	174,15	kWh/t cana	=((B73*((B33-B32)/100)+B74)*B75)
77	Energia BIG-GT	626,95	MJ / t cana	=B82*3,6
78				
79				
80	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
81				
82	Produção de Energia Elétrica Excedente	223,77	kWh	=B55+B76
83	Produção de Etanol	102,85	L	=B68
84	Energia - Energia elétrica excedente	805,58	MJ	=3,6*B82
85	Energia - Etanol	2395,40	MJ	=23,29*B83
86	Energia total produzida	3200,99	MJ	=SOMA(B84:B85)
87	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	39,57%	%	=B86/B20
88	Rendimento da energia da planta industrial	49,51%	%	=B86/B21

Figura II - 2 - Memorial de Cálculo: Estudo de Caso III

II.3 Memorial de Cálculo - Estudo de Caso IV

	A	B	C	D
1	Memorial de cálculo - Cenário IV			
2				
3				
4				
5	DADOS DA CANA			
6				
7	PCC	17,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
8	Fibra	13,30	%	Dados disponibilizados pela COSAN
9	AR	0,52	%	[MACEDO; LEAL; SILVA, 2004]
10	ART	18,41	%	Dados disponibilizados pela COSAN
11	PALHA	140,00	t / t cana	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
12	ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DE PALHA	50,00	%	[CGEE, 2008]
13	PALHA OBTIDA NA SEGUNDA GERAÇÃO	70,00	t / t cana	=B11*B12/100
14	ENERGIA NO BAGASSO	18,10	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
15	ENERGIA NA PALHA	17,40	MJ / kg	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
16	ENERGIA NO AÇÚCAR	17,60	MJ / kg	[CGEE, 2008]
17	ENERGIA DO AÇÚCAR DA CANA DE AÇÚCAR	3240,99	MJ / t	=B16*B10*10
18	ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR	2407,30	MJ / t	=B14*B8*10
19	ENERGIA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR	2436,00	MJ / t	=B11*B15
20	ENERGIA PRIMÁRIA NA CANA DE AÇÚCAR (EP)	8084,29	MJ / t	=SOMA(B17:B19)
21	ENERGIA NA PLANTA INDUSTRIAL (EPI)	6460,29	MJ / t	=B17+B18+B22*0,5
22	PERDA (1)	1624,00	MJ / t	=B20-B21
23				
24				
25	RECEPÇÃO E EXTRAÇÃO			
26				
27	PERDAS NA LAVAGEM DA CANA	2,00	%	Sistema de limpeza a seco
28	AÇÚCAR NO (PE)	180,46	kg / t cana	=(B10*10)*(1-(B27/100))
29	ENERGIA NO PREPARO E RECEPÇÃO (EPE)	5583,47	MJ / t	=B28*B16+B18
30	PERDA (2)	876,82	MJ / t	=B21-B29
31	EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO	98,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
32	POL NO BAGAÇO	1,23		Dados disponibilizados pela COSAN
33	UMIDADE DO BAGAÇO	50,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
34	BAGAÇO (3)	275,71	kg / t cana	Dados disponibilizados pela COSAN
35	AÇÚCAR EM (4)	176,86	kg / t cana	=B28*B31/100
36				
37				
38	GERAÇÃO DE VAPOR			
39				
40	Pressão de Caldeira	100,00	kgf/cm ² g	Dados disponibilizados pela COSAN
41	Temperatura da Caldeira	530,00	°C	Dados disponibilizados pela COSAN
42	Consumo de Vapor (7)	481,47	kg	Dados disponibilizados pela COSAN
43	Entalpia de Vapor de Alta Pressão	3450,00	kJ / kg	Dados Calculados (P=100bar e 530°C)
44	Entalpia de água de alimentação	491,86	kJ / kg	Dados Calculados (P=130bar e 118°C)
45	Produção de vapor/ kg de bagaço	2,18	kgv / kg bag	Dados disponibilizados pela COSAN
46	Consumo de Bagaço	220,86	kg / t cana	=B42/B45
47	Bagaço Excedente	54,85	kg / t cana	=B34-B46
48				
49				
50	TURBO-GERADORES (CONTRAPRESSÃO)			
51				
52	Produção Energia Elétrica x vapor (Contrapressão)	6,06	kg / kWh	Dados disponibilizados pela COSAN
53	Produção de Energia Elétrica	79,45	kWh	=B42/B52
54	Consumo de Energia Elétrica	29,83	kWh	Dados disponibilizados pela COSAN
55	Produção de Energia Elétrica Excedente (8)	49,62	kWh	=B53-B54
56	Energia Elétrica Produzida	286,02	MJ / t cana	=B53*3,6
57	Energia no vapor de processo	2,17	MJ / kgv	Dados Calculados (P=2,5bar e 128°C)
58	Energia contida no vapor de processo	1044,79	MJ	=B42*B57
59				
60				

	A	B	C	D
61	PRODUÇÃO DE ETANOL			
62				
63	Entrada de açúcar no Caldo Misto	177,90	kg / t cana	Dados disponibilizados pela COSAN
64	Eficiência no Tratamento de Caldo	99,81	%	Dados disponibilizados pela COSAN
65	Eficiência na Fermentação	90,00	%	Dados disponibilizados pela COSAN
66	Eficiência da Destilaria	99,50	%	Dados disponibilizados pela COSAN
67	Produção de Etanol	81,25	kg / t cana	=B63*0,511*B66*B65*B64/100/100/100
68	Produção de Etanol	102,85	L / t cana	=B67/0,79 -Confirmado - dados da COSAN
69				
70				
71	TECNOLOGIA BIG-GT			
72				
73	Bagaco a ser gaseificado	275,71	kg / t cana	=B34
74	Palha a ser gaseificada	70,00	kg / t cana	=B13
75	Biomassa a Base Seca	204,46	kg / t cana	=(B73*((B33-B32)/100)+B74)
76	Demanda de vapor de processo	481,47	kg / t cana	Dados disponibilizados pela COSAN
77	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica e vapor	0,91	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
78	Taxa de produção de vapor	3,07	kgv / kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
79	Consumo de Biomassa para o vapor de processo	156,83	kg / t cana	=B76/B78
80	Produção de Vapor para processo	481,47	kgv/ t cana	=B79*3,07
81	Produção de Energia Elétrica	142,72	kWh/t cana	=B79*B77
82	Taxa de conversão de biomassa x energia elétrica	1,80	kWh/kg biomassa	[HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005]
83	Energia Elétrica Produzida	85,74	kWh/t cana	=(B75-B79)*B82
84	Energia BIG-GT	308,66	MJ / t cana	=B83*3,6
85				
86				
87	ENERGIA TOTAL PRODUZIDA			
88				
89	Produção de Energia Elétrica Excedente	278,08	kWh	=B55+B81+B83
90	Produção de Etanol	102,85	L	=B68
91	Energia - Energia elétrica excedente	1001,07	MJ	=3,6*B89
92	Energia - Etanol	2395,40	MJ	=23,29*B90
93	Energia total produzida	3396,48	MJ	=SOMA(B91:B92)
94	Rendimento da energia da cana-de-açúcar	42,01%	%	=B93/B20
95	Rendimento da energia da planta industrial	52,57%	%	=B93/B21

Figura II - 3 - Memorial de Cálculo: Estudo de Caso IV