



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

HERBET FILIPE DOS SANTOS SOUSA

**UMA PERSPECTIVA DA COGERAÇÃO NA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA DO BAGAÇO
DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2014

HERBET FILIPE DOS SANTOS SOUSA

UMA PERSPECTIVA DA COGERAÇÃO NA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA DO BAGAÇO
DA CANA-DE-AÇÚCAR

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2014

HERBET FILIPE DOS SANTOS SOUSA

UMA PERSPECTIVA DA COGERAÇÃO NA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA DO BAGAÇO
DA CANA-DE-AÇÚCAR

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos,
donos de todo o meu sucesso e inspiração de
todo o meu esforço.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial, à Universidade Federal de Campina Grande, que me possibilitou, entre tantas outras coisas, a realização de um sonho.

Agradeço ao coração da cidade de Campina Grande, que me acolheu como seu filho, e ao entendimento disto, por parte de minha Pombal.

Agradeço também aos meus pais, Seu Severino e Dona Socorro, que sempre me incentivaram e me aclararam sobre os benefícios do verbo estudar em minha vida, e que para tal, não deixaram nada faltar.

Agradeço aos meus irmãos, que me encheram de carinho e não mediram esforços para me auxiliarem nesta caminhada.

Agradeço aos meus bons, velhos e novos amigos, que entenderam todas as minhas deixas e faltas necessárias como requisitos para a conclusão deste objetivo, assim como à minha namorada que me doou muita paz e serenidade para a conclusão desta reta final do curso, especialmente na redação deste trabalho.

Agradeço ao meu amigo Professor Leimar de Oliveira que me orientou neste projeto com bastante paciência e dedicação.

“O homem que mais tem vivido não é aquele que conta mais anos, mas, sim, aquele que mais tem sentido a vida.
Jean-Jacques Rousseau

RESUMO

A aplicação do conceito de cogeração é uma saída eficiente para o problema da reduzida eficiência energética da geração termelétrica de energia. A cogeração é, portanto, uma alternativa viabilizadora dos projetos de geração de energia elétrica a partir da biomassa do bagaço da cana. As necessidades na redução de emissão de poluentes e na diminuição da dependência dos países exportadores de petróleo elevaram a importância de se ter uma matriz energética diversificada com a forte inclusão de fontes renováveis alternativas. A cana-de-açúcar, presente no Brasil desde 1532, lidera a economia nacional pela produção sucroalcooleira por dois séculos. Por possuir tamanha participação em nossa agricultura, assim como devido às novas tecnologias, nas últimas décadas, o setor canavieiro vem se reinventando. Pretende-se com este trabalho fazer uma abordagem sistêmica dos aspectos tecnológicos e viabilizadores da implementação do empreendimento de cogeração como parte intrínseca do sistema elétrico nacional, em suas várias vertentes.

Palavras-chave: Cogeração, biomassa, bagaço, cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The application of the concept of cogeneration is an efficient solution to the problem of reduced energy efficiency of thermal power generation. The cogeneration is, then, an affordable choice from projects of power electric generation from biomass sugarcane bagasse. The requirements to reduce emission of pollutants and decreasing the dependency of the oil-exporting countries raised the importance to have a diversified energy matrix with strong inclusion of renewable alternative sources. The cane sugar, introduced in Brazil since 1532, moves the national economy by sugarcane production for two centuries. Because it takes part in our agriculture, and also because of new technologies in recent decades, the sugarcane industry is innovating itself. The aim of this work is to make a systemic approach of technological and viable aspects of the implementation of cogeneration project as an intrinsic part of the national electricity system, in its several sides.

Keywords: cogeneration, biomass, bagasse, cane sugar.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Classificação das fontes renováveis	16
Figura 2 Eficiência de um Gerador Termelétrico	17
Figura 3 Eficiência de um Gerador Termelétrico com o uso da Cogeração.....	18
Figura 4 Evolução da capacidade instalada por fonte de geração (Empresa de Pesquisa Energética, 2013).....	21
Figura 5 Matriz Elétrica Brasileira	22
Figura 6 Participação de fontes renováveis na matriz elétrica	23
Figura 7 Repartição da Oferta Interna de Energia.....	27
Figura 8 Épocas de colheitas de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil.....	28
Figura 9 Sistema de Colheita Semi-mecanizado. (a) Corte Manual; (b) Carregamento; (c): Transporte	29
Figura 10 Sistema de Colheita Mecanizado. (a) Colheita mecanizada com colhedora autopropelida e carregamento do transbordo; (b) Descarregamento do transbordo em carretas; (c) Transporte.....	30
Figura 11 Esquema genérico de produção de etanol	32
Figura 12 Esquema Geral da produção de etanol e açúcar a partir da cana	33
Figura 13 Rotas Tecnológicas para Conversão da Biomassa	36
Figura 14 Esquemático de geração com ciclo a vapor <i>Rankine</i>	38
Figura 15 Instalação industrial onde se usa turbinas a vapor. Notar à esquerda caldeira de condensação, uma das maiores do mundo (Matimba, África do Sul).	42
Figura 16 Esquema genérico de um Ciclo <i>Brayton</i>	42
Figura 17 Turbina a gás Allison 601-KB9, de 6,5 MW (Rolls-Royce Energy Systems, 1998) (apud (Barja, 2006)).	43
Figura 18 Sistema de turbinas a gás (Fábrica da Cerveja Kaiser - Brasil) (apud (Brandão, 2004)).....	45
Figura 19 Sistema de turbinas a gás (Fábrica de Cerveja Brahma -Brasil)(apud (Brandão, 2004)).....	45

Figura 20 Esquema generalizado de um sistema com ciclo combinado (adaptado de (Brandão, 2004)).....	47
Figura 21 Central cogeneradora TermoRio, 1.040 MW, Duque de Caxias-RJ. (Foto: TermoRio S.A., 2004)	48
Figura 22 Balanço energético de um sistema convencional de geração termelétrica	51
Figura 23 Balanço energético de um sistema de geração termelétrica utilizando a cogeração	52
Figura 24 Faixas de temperaturas do ciclo <i>topping</i>	55
Figura 25 Esquema genérico de um Ciclo <i>Topping</i>	56
Figura 26 Esquema generalizado para Ciclo <i>Topping</i>	57
Figura 27 Faixa de temperaturas do Ciclo <i>Bottoming</i>	58
Figura 28 Esquema genérico de um <i>Bottoming Cycle</i>	59
Figura 29 Esquema simplificado para a configuração <i>Bottoming Cycle</i>	59
Figura 30 Exemplo simplificado de um sistema de cogeração	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características Técnicas dos Ciclos Tradicionais de Contrapressão	39
Tabela 2 Breve Histórico da Cogeração	53
Tabela 3 Cultivo da Cana-de-açúcar nos principais estados (safra 2012/2013).....	61
Tabela 4 Breves Descrições das Usinas	68
Tabela 5 Estrutura da Usina Cerradinho.....	69
Tabela 6 Estrutura da Usina Santa Isabel	70
Tabela 7 Estrutura da Usina Santa Cândida	71
Tabela 8 Estrutura da Usina Catanduva	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C = Graus *Celsius*, unidade de temperatura.

bar = unidade de pressão

CPFL = Companhia Paulista de Força e Luz

Eletrobras = Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

Eletropaulo = Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A.

GL = *Gay Lussac*, unidade de volume

IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA = International Energy Agency

OCDE = Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

Pa, Mpa = *Pascal* e *Mega Pascal* (um milhão de *Pascal*) respectivamente, unidade de pressão.

PROINFRA = Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
tep e Mtep = tonelada equivalente de petróleo e *Mega* (10^6) tonelada equivalente de petróleo. tep é uma unidade de energia definida como o calor libertado na combustão de uma tonelada de petróleo cru.

ton_{cana} = Toneladas de cana-de-açúcar, unidade de peso.

UHE = Usina Hidrelétrica

W, kW, MW = *Watts*, *quillowatts* (mil *watts*), e *Megawatts* (um milhão de *watts*) respectivamente, unidades de potência elétrica.

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Lista de Ilustrações	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xii
Sumário.....	xiii
1 Introdução	15
1.1 Estrutura do Trabalho	18
2 Cenário Brasileiro Atual	20
2.1 A Matriz Elétrica Brasileira.....	21
3 A Biomassa da Cana-de-açúcar como Fonte de Energia da Cogeração	25
3.1 A Cultura da Biomassa no Brasil.....	26
3.2 O Aproveitamento Energético da Cana-de-açúcar	28
3.2.1 A Colheita da Cana-de-açúcar.....	28
3.2.2 A Produção do Etanol	31
3.2.3 Geração de Energia Elétrica com a Biomassa da Cana-de-açúcar no Brasil	34
4 Tecnologias para Produção de Eletricidade a partir da Biomassa	36
4.1 Ciclos com Turbinas a Vapor	37
4.1.1 Ciclos a Vapor com Turbinas a Contrapressão	39
4.1.2 Ciclos a Vapor com Turbinas de Condensação e Extração.....	41
4.2 Ciclos Com Turbinas a Gás	42
4.3 Ciclos Combinados	46
5 Cogeração: Uma Alternativa Eficiente	50
5.1 Histórico da Cogeração no Brasil	52
5.2 Sequência de Aproveitamento da Energia – Os Ciclos <i>Topping e Bottoming</i> . 55	
5.2.1 Ciclos <i>Topping</i>	55
5.2.2 Ciclos <i>Bottoming</i>	57
5.3 Benefícios da Cogeração	59
5.3.1 Vantagens do Brasil no Contexto da Cogeração do Bagaço da Cana.....	61
5.4 A Cogeração do Bagaço da Cana no Brasil	62
6 A Cogeração da Biomassa do Bagaço da Cana-de-açúcar Aplicada no Brasil	65
6.1 Breve Histórico da Regulamentação da Cogeração.....	65

6.2	Estado da Arte da Cogeração	66
6.2.1	Variedades da cana.....	66
6.2.2	Genoma da Cana	66
6.2.3	Hidrólise de Materiais Lignocelulósicos.....	67
6.2.4	Co-geração e outros usos para o bagaço e a palha	67
6.3	Aplicações da Cogeração em Sucroalcooleiras Brasileiras	67
6.3.1	Usina Cerradinho.....	68
6.3.2	Usina Santa Isabel	69
6.3.3	Usina Santa Cândida	70
6.3.4	Usina Catanduva	71
7	Conclusões	73
	Bibliografia.....	74

1 INTRODUÇÃO

No mundo em que se vive, é possível afirmar veementemente que a energia elétrica é um dos principais insumos para a manutenção das atividades da sociedade. O advento da tecnologia ao passo da evolução das necessidades do homem fez com que o fornecimento de eletricidade em significativa quantidade e qualidade passasse a ser um dos assuntos mais cuidadosamente tratados nos últimos anos.

O crescimento impulsionado do consumo de energia, embora possa refletir o desenvolvimento econômico de uma região, traz à tona a problemática do possível esgotamento dos recursos necessários à produção de energia elétrica.

Uma das maneiras mais modernas e utilizadas no mundo para conter a expansão do consumo sem comprometer qualidade de vida e desenvolvimento econômico tem sido o estímulo ao uso eficiente, programas de conservação de energia (Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, 2008).

A eficiência energética é um tópico importante a se tratar quando se fala em energia elétrica. A necessidade de suprir a demanda crescente de eletricidade endossa a necessidade do avanço nos estudos de como racionalizar e melhor aproveitar a energia na forma primária.

A eficiência energética diz respeito ao menor consumo de energia para um mesmo produto final e está geralmente associado a novas tecnologias e a melhor organização e gestão de recursos. Consumir energia de forma eficiente é um imperativo no contexto dos desafios enfrentados pelo setor energético de qualquer país, tais quais: segurança energética, redução de custos energéticos ou combate à mudança climática (GVCES & IEDI, 2010).

A cogeração surge como um tópico especial da eficiência energética e é, em suma, o aproveitamento técnico e racional da parcela de energia que seria desperdiçada no processo de geração. Por mais eficiente que venha a ser um gerador termelétrico, parte da energia disponibilizada pelo combustível é inevitavelmente convertida em calor.

Cogeração é a produção simultânea e de forma sequenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível. O processo mais comum é a produção de eletricidade e energia térmica (calor ou frio) a partir do uso de gás natural e/ou de biomassa, entre outros (Associação da Indústria de Cogeração de Energia - COGEN).

Outro ponto relevante a se considerar com relação ao fornecimento adequado de energia para a dada demanda é a diversificação da matriz energética. A instalação de fontes alternativas de geração de energia pode possibilitar, a um país, saídas convenientemente inteligentes para o problema do esgotamento dos recursos.

Fontes alternativas de energia são determinadas fontes que não fazem parte do padrão convencional no sistema elétrico de uma região. Destacam-se, dentro das fontes alternativas, as fontes renováveis que possuem seus processos naturais renovados. A IEA classifica as energias renováveis em três grandes grupos, e deles partem outras classificações, como demonstrado na Figura 1.

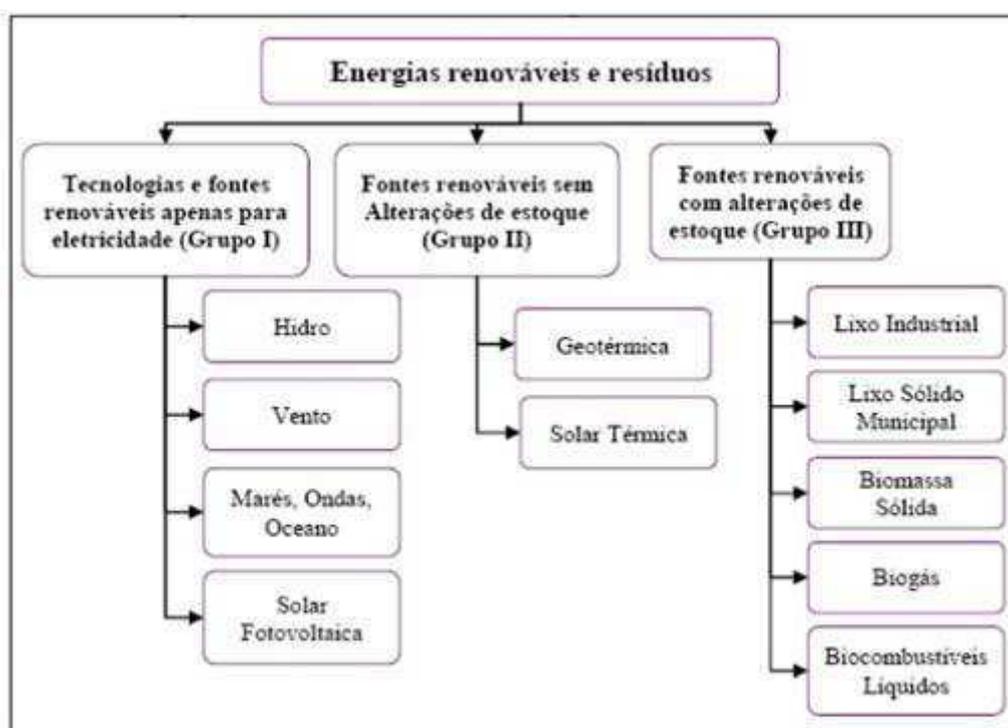


Figura 1 Classificação das fontes renováveis (IEA; OECD; Eurostat, 2005).

Dentre os tipos de fontes renováveis, o presente trabalho se dedicará nos demais capítulos à biomassa sólida, em especial ao bagaço da cana-de-açúcar, que faz parte do grupo das Fontes Renováveis com Alterações de Estoque.

É válido destacar que a energia da biomassa é uma fonte importante de energia renovável. Além de ser um recurso participativo da matriz energética, esse tipo de geração também auxilia na diminuição do CO₂ na atmosfera e na redução da quantidade de dejetos nos aterros.

Na geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar, parcela da energia concedida por esse tipo de biomassa é convertida em eletricidade e outra em calor que, a priori, é desperdiçada, como pode ser visto no diagrama exposto na Figura 2.

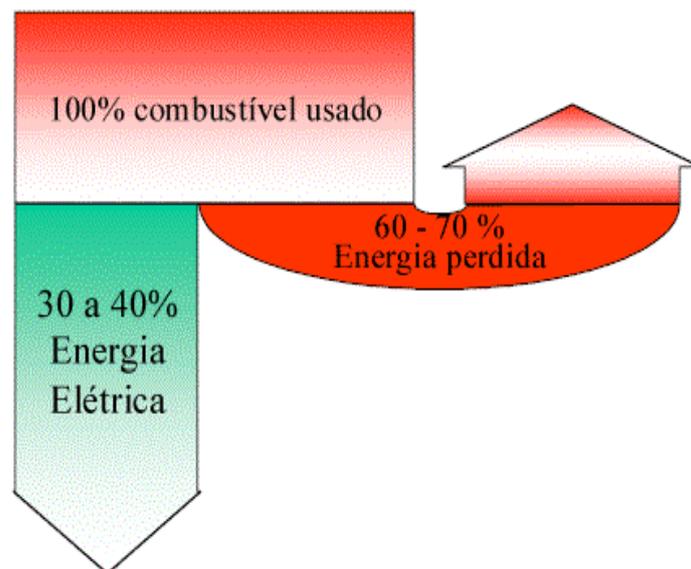


Figura 2 Eficiência de um Gerador Termelétrico

Dada a necessidade do homem em melhor aproveitar seus recursos, a técnica da cogeração é então implantada neste processo de geração, possibilitando que a fração energética convertida na forma de calor seja utilizada de alguma outra forma. A alimentação de parte do processo industrial na forma de vapor ou água quente ou até mesmo o suprimento das necessidades básicas do parque da indústria como água quente nos banheiros, vapor aos aquecedores etc. corroboram a indispensabilidade das técnicas de cogeração.

É possível verificar no esquema mostrado na Figura 3 uma utilização mais racional da energia gerada pelo poder calorífico da biomassa após a instalação da técnica de cogeração no processo.

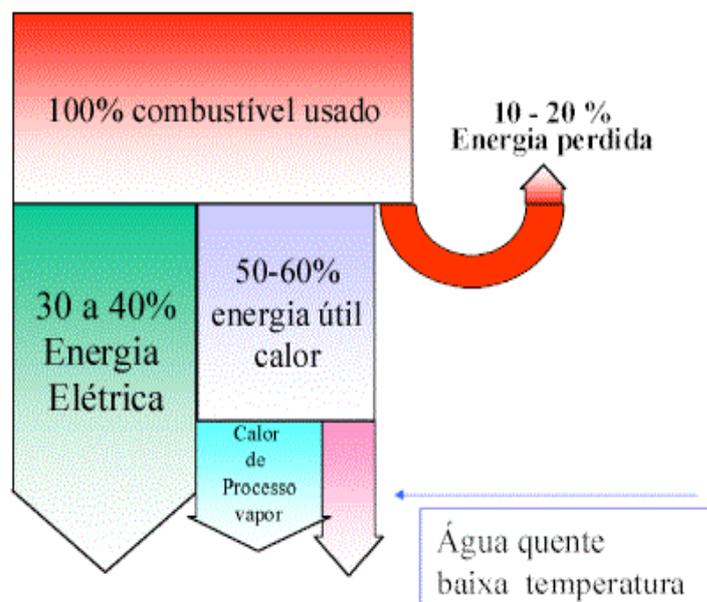


Figura 3 Eficiência de um Gerador Termelétrico com o uso da Cogeração

A parcela de energia que seria desperdiçada é então reaproveitada na forma de combustível que auxilia parte do processo industrial (vapor) e do aquecimento de água.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 deste trabalho trata da introdução ao embasamento teórico que será apresentado no decorrer deste trabalho, destacando a definição do bagaço da cana como fonte renovável alternativa e o conceito de cogeração.

No Capítulo 2, encontra-se um apanhado geral sobre o cenário atual brasileiro do ponto de vista da Oferta de Energia Interna, da participação de energia renovável e prospecção da participação de fontes renováveis alternativas no futuro, exaltando a cultura da biomassa do Brasil para com o mundo. São destaques deste capítulo a matriz elétrica brasileira como uma das mais limpas do mundo, a participação de fontes renováveis na matriz elétrica e a importância da biomassa nesta.

O Capítulo 3 abordará sobre a biomassa da cana-de-açúcar como fonte de energia em sistemas de cogeração. Destaca-se nesta seção a viabilidade do aproveitamento do bagaço da cana, por ser o subproduto de uma cultura largamente cultivada no Brasil. É evidenciado que a participação desta fonte na matriz energética é importante não só para a diversificação da matriz, mas também porque a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a

maior potência instalada em hidrelétricas do país. O aproveitamento energético da cana-de-açúcar será destacado neste capítulo, desde a colheita desta matéria-prima à produção de eletricidade.

Encontra-se no Capítulo 4 tecnologias para produção de eletricidade a partir da biomassa. Referente a estas rotas tecnológicas, destacam-se os ciclos com turbinas a vapor (ciclos *Rankine*), mencionando as tecnologias alternativas de turbinas a vapor a contrapressão ou condensação e extração; os ciclos com turbinas a gás (ciclos *Brayton*); ciclos combinados, que é a integração de dois ou mais ciclos de modo a reduzir ao máximo as perdas energéticas, aumentando o rendimento global da planta industrial.

A cogeração como uma alternativa eficiente será abordada no Capítulo 5. Nesta análise serão abordados os temas: histórico da cogeração no Brasil; Descrição da sequência de aproveitamento de energia nos ciclos *Topping e Bottoming*; benefícios da cogeração, destacando a produção de energia de forma muito eficiente, trazendo uma série de benefícios e a temática das vantagens do uso do bagaço da cana dado o potencial brasileiro; e finalmente a cogeração, em si, do bagaço da cana no Brasil.

O Capítulo 6 conterà um breve histórico da regulamentação da cogeração, o estado da arte da cogeração (tecnologias atuais desenvolvidas ou em desenvolvimento), que se destacam os aperfeiçoamentos genéticos da própria cana-de-açúcar e novas utilidades ou formas de aproveitamento desta matéria-prima. Ainda serão apresentadas aplicações da cogeração em sucroalcooleiras brasileiras, sendo destacadas quatro usinas que utilizam a cogeração no estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil.

2 CENÁRIO BRASILEIRO ATUAL

Em 2013, a oferta interna de energia (total de energia demandada no país) atingiu 296,2 Mtep, registrando uma taxa de crescimento de 4,5% ante a evolução do PIB nacional de 2,3%, segundo o último dado divulgado pelo IBGE (Empresa de Pesquisa Energética, 2014).

O acréscimo no consumo de energia no Brasil é reflexo da taxa de desenvolvimento econômico, tecnológico e da qualidade de vida do brasileiro. Reflete ainda o aumento populacional, a corrida desenvolvimentista dos centros urbanos e os incentivos de integração social. Refere-se também ao ritmo das atividades dos setores industrial, comercial e de serviços.

Para suprir a demanda de consumo crescente é necessária a geração de energia elétrica em maior quantidade e de forma mais eficiente.

A maior parte da geração de energia elétrica no Brasil na forma hidráulica converge para uma elevada participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira – 79,3% da eletricidade gerada em 2013, dos quais 70,6% são de responsabilidade das hidrelétricas.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2012-2022, prevê-se a participação das fontes renováveis em 85,8% da capacidade instalada e a manutenção das grandes hidrelétricas como fonte principal, ainda que com menor relevância – respondendo por cerca de 65% da capacidade instalada no país até 2022. Vale mencionar o crescimento previsto da capacidade instalada no país para pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (3,8%), biomassa (7,5%) e eólica (9,5%), que, junto com as outras fontes renováveis (excluindo a hidráulica), comporão 20,8% em 2022, ante 12,8% em 2012. A projeção dos dados de capacidade instalada por fonte de geração pode ser analisada a partir dos gráficos dispostos na Figura 4.

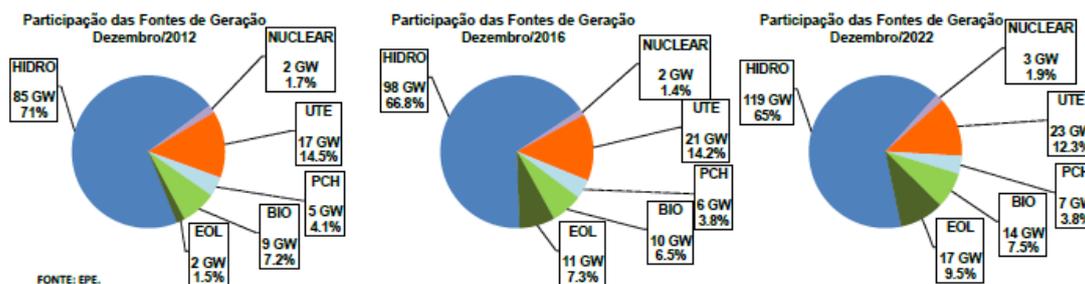


Figura 4 Evolução da capacidade instalada por fonte de geração (Empresa de Pesquisa Energética, 2013)

No decorrer deste Capítulo serão apresentados alguns pontos relevantes sobre a situação brasileira no cenário energético, exaltando a cultura da biomassa no Brasil para com o mundo. Serão abordados como tópicos a análise da matriz energética atual brasileira em comparação com o mundo, fontes renováveis e a apresentação da geração de energia elétrica a partir da biomassa como fonte alternativa atrativa.

2.1 A MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A energia elétrica fornecida à sociedade brasileira para produção de bens e serviços é gerada a partir de diversas fontes de energia primária, sendo a hidráulica a principal fonte participativa deste conjunto. A esse conjunto de variedades é dado o nome de matriz elétrica.

A opção brasileira pelo modelo hidrelétrico se deve à existência de grandes rios de planalto, que são alimentados por chuvas tropicais abundantes e constituem uma das maiores reservas de água doce do mundo. Além disso, a energia hidrelétrica é, em geral, mais barata no aspecto operacional e emite menos CO₂ que as termelétricas.

Na Figura 5 visualizam-se as parcelas percentuais de participação de cada fonte de energia levantadas no Balanço Energético 2014, com base de dados de 2013.

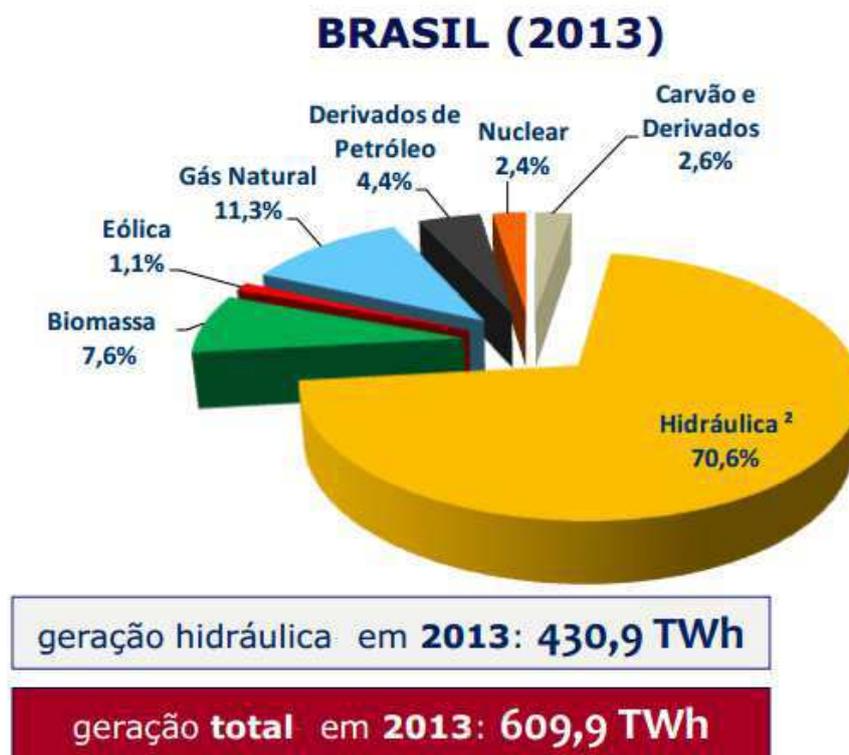


Figura 5 Matriz Elétrica Brasileira
(Empresa de Pesquisa Energética, 2014)

É possível verificar, portanto, a grande participação da energia hidráulica em nossa matriz elétrica. A grande proporção da fonte convencional (hidráulica) como fonte limpa, garante o alto índice de participação de fontes limpas na matriz, assegurando, a posição brasileira como grande gerador de energia limpa.

A matriz elétrica brasileira é uma das mais limpas do mundo, com forte presença de fontes renováveis de energia. Como pode ser inferido da Figura 6, enquanto no Brasil as renováveis têm 79,3% de participação, no mundo esse percentual é pouco superior a 20% e nos países membros da OCDE, não passa muito de 18% (Empresa de Pesquisa Energética, 2014).

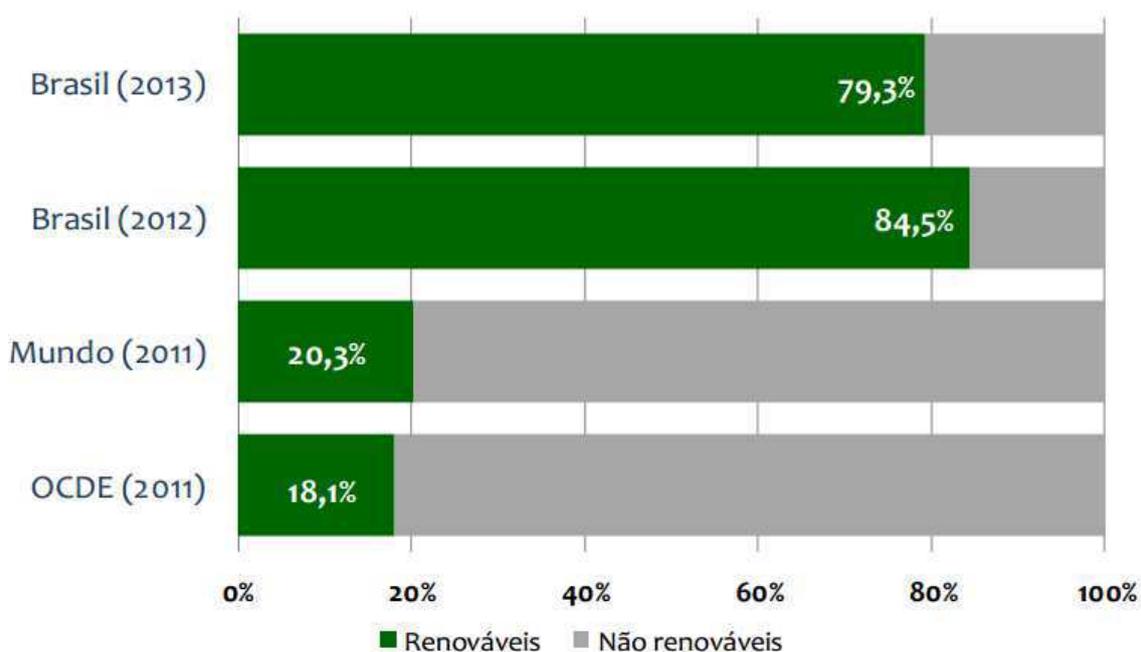


Figura 6 Participação de fontes renováveis na matriz elétrica
(Empresa de Pesquisa Energética, 2014)

A participação das fontes renováveis na Matriz Elétrica Brasileira foi reduzida em cerca de 5% devido às condições hidrológicas desfavoráveis e ao aumento da geração térmica.

Em segundo lugar na matriz elétrica brasileira estão as usinas termelétricas, que ganharam importância como complementação da matriz hidráulica, especialmente a partir do final da década de 90. De 2012 a 2013, segundo o Balanço Energético 2014, houve um crescimento de 31% na geração termelétrica.

As termelétricas diminuem a dependência brasileira das hidrelétricas. Também reduzem o risco de racionamento em caso de escassez de chuvas ou diminuição dos volumes de água nos reservatórios. Outra vantagem das termelétricas é que elas podem ser instaladas perto dos grandes centros consumidores, diminuindo assim as perdas de transmissão e melhorando a qualidade da energia fornecida.

A queima de combustíveis é a base da energia produzida nas termelétricas. O setor tem como matérias-primas o gás natural (40,0%), os derivados do petróleo (15,4%), o carvão e derivados (9,2%), a nuclear (8,5%) e a biomassa (26,9%) – bagaço de cana de açúcar, lixívia, lenha e demais recuperações (Empresa de Pesquisa Energética, 2014). Com base nestes dados, é possível perceber a importância da

biomassa na matriz elétrica brasileira, visto que é a fonte renovável alternativa com maior representatividade frente às demais.

3 A BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO FONTE DE ENERGIA DA COGERAÇÃO

Pode ser considerado como biomassa todo recurso renovável que provêm de matéria orgânica - de origem vegetal ou animal - tendo por objetivo principal a produção de energia (Ministério do Meio Ambiente).

Dentre os tipos de biomassa, a oriunda da cana-de-açúcar destaca-se por utilizar-se de um produto largamente cultivado no Brasil. O reaproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar é evidentemente viável em nosso país. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana, como também é o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol e conquista, cada vez mais, o mercado externo com o uso do biocombustível como alternativa energética.

Entende-se por bagaço da cana a biomassa constituída de fibras moídas da cana resultante do processo de extração, que pode ser usado como matéria-prima para indústria de papel e celulose, de produtos como ração animal e fertilizante no setor agrícola e, principalmente, como insumo energético.

A cana-de-açúcar é um recurso com grande potencial, dentre as fontes de biomassa, para geração de eletricidade existente no país, por meio da utilização do bagaço e da palha. A participação é importante não só para a diversificação da matriz elétrica, mas também porque a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país. A eletricidade fornecida neste período auxilia, portanto, a preservação dos níveis dos reservatórios das UHEs (Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, 2008).

No contexto das fontes alternativas apenas a biomassa, e em especial a cana-de-açúcar, possui tecnologia suficiente para atender de forma eficiente o setor elétrico e o de transportes simultaneamente.

3.1 A CULTURA DA BIOMASSA NO BRASIL

Há pouco mais de um século, a biomassa era líder no cenário mundial energético, porém com o advento do carvão, petróleo e gás natural, o uso da biomassa foi drasticamente reduzido. As necessidades na redução de emissão de poluentes e na diminuição da dependência dos países exportadores de petróleo elevaram a importância de se ter uma matriz energética diversificada com a forte inclusão de fontes renováveis alternativas.

A principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos. Os principais resíduos utilizados em nível mundial para produção energética são os vegetais. Entre os principais produtos agrícolas para obtenção de energia destacam-se a cana-de-açúcar, seguida do arroz, da mandioca e do milho. Destas matérias-primas é possível tanto extrair energia elétrica quanto combustível – os biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol.

Os resíduos vegetais são obtidos como resultados dos processos de colheita dos produtos agrícolas. Faz parte da cultura brasileira o foco na agricultura como fonte econômica, logo, se vê que o Brasil tem enorme potencial na produção de energia a partir da biomassa de resíduos vegetais.

As tecnologias existentes possibilitam o aproveitamento energético dos nossos resíduos gerados. No entanto, boa parte desses resíduos agroindustriais não é aproveitada e parte deles é utilizada como ração animal, na forma de fertilizantes ou na área da medicina.

O bagaço de cana é o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil. Uma tonelada de cana-de-açúcar gera cerca de 250 kg de bagaço, dos quais 90% são usados na produção de energia. Estima-se que a cada ano sejam produzidos de 5 a 12 milhões de toneladas desse material, correspondendo a cerca de 30% do total da cana moída.

Decorrentes principalmente de investimentos públicos e privados na produção alcooleira, o bagaço da cana tem sido produzido cada vez em quantidades maiores devido ao aumento da área plantada e da industrialização da cana-de-açúcar. A melhoria do balanço energético das antigas usinas e a entrada de atividade de um número cada vez maior de destilarias autônomas aumentou a porcentagem de sobras consideravelmente.

Sob uma perspectiva maior do conceito de energia (não englobando tão somente a eletricidade, como também os combustíveis para as mais diversas finalidades) é possível perceber a relevância da biomassa e em especial, do bagaço da cana-de-açúcar no cenário energético interno. Observa-se, na Figura 7, a grande participação da biomassa, exclusivamente da cana-de-açúcar, na oferta de energia interna do Brasil.



Figura 7 Repartição da Oferta Interna de Energia
Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética, 2014)

A cana-de-açúcar possui a maior produção agrícola em todo o mundo, esta é encabeçada pelo Brasil com uma produção de cana para ser moída de 652,02 milhões de toneladas na safra 2013/2014 (Companhia Nacional de Abastecimento., 2013). Enquanto o Brasil lidera a produção mundial da cana, a China tem a maior produção de arroz, os EUA é o maior produtor de milho e a União Europeia é líder na produção de beterraba. Como se obtém álcool do milho e da beterraba, os EUA e a União Europeia são os principais concorrentes do nosso produto energético – a cana-de-açúcar.

O mais interessante da utilização da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar, principalmente em projetos de cogeração, é que o que antes era um rejeito no processo passou a se integrar ao ciclo produtivo, trazendo economia para as empresas e contribuindo para a sustentabilidade do planeta.

3.2 O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR

3.2.1 A COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea semi-perene e originária provavelmente do sudeste da Ásia. Não é cultura exigente em solos, porém, se desenvolve melhor em solos com boa aeração e boa drenagem (Centro de Tecnologia Copersucar, 1988).

O ciclo da cana-planta pode se dar a partir da data do plantio de 12 meses, para cana de ano, de 12 a 14 meses para cana de inverno e 18 meses, para cana de ano e meio. Após o primeiro corte o ciclo passa a ser de 12 meses para todas as variedades, como visto na Figura 8.

Período de Safra na região Centro-Sul do Brasil

<i>Cana de ano e meio</i>											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
			Var. Precoce		Var. Média			Var. Tardia			

<i>Cana de inverno</i>												
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
				Var. Precoce		Var. Média			Var. Tardia			

<i>Cana de ano</i>											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
								Var. Tardia			

Figura 8 Épocas de colheitas de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil.

O Brasil é o maior produtor mundial de açúcar a partir da cana no mundo. Esse setor representa uma considerável fatia do PIB agrícola nacional. Aponta-se o estado de São Paulo como responsável por mais da metade da colheita brasileira.

A qualidade do produto direcionado às usinas depende muito da qualidade da etapa da colheita. Historicamente a colheita era realizada de forma totalmente manual. O primeiro passo realizado para a mecanização foi o carregamento mecânico dos colmos (tipo de caule da cana-de-açúcar) inteiros.

Diversas propostas de mecanização das colheitas vêm sendo testadas ao longo dos anos. São encontrados no Brasil três sistemas básicos de colheita e transporte de matéria-prima denominados manual, semi-mecanizado e mecanizado.

Os sistemas manual e semi-mecanizado utilizam corte manual, que inviabiliza a colheita sem a queima. Atualmente 40% da área colhida de cana-de-açúcar utiliza o sistema mecanizado, com ou sem queima prévia para limpeza do canavial.

No estado de São Paulo, há a predominância dos sistemas semi-mecanizado e do mecanizado. O sistemas semi-mecanizado consiste em corte manual dos colmos após a queima controlada da palha da cana, procedimento informado e autorizado pela Secretaria do Meio Ambiente, e o carregamento é realizado por máquina carregadoras que depositam a cana em carretas tracionadas por tratores ou caminhões. O caminhão transporta a cana para a usina. O procedimento pode ser visualizado na Figura 9.

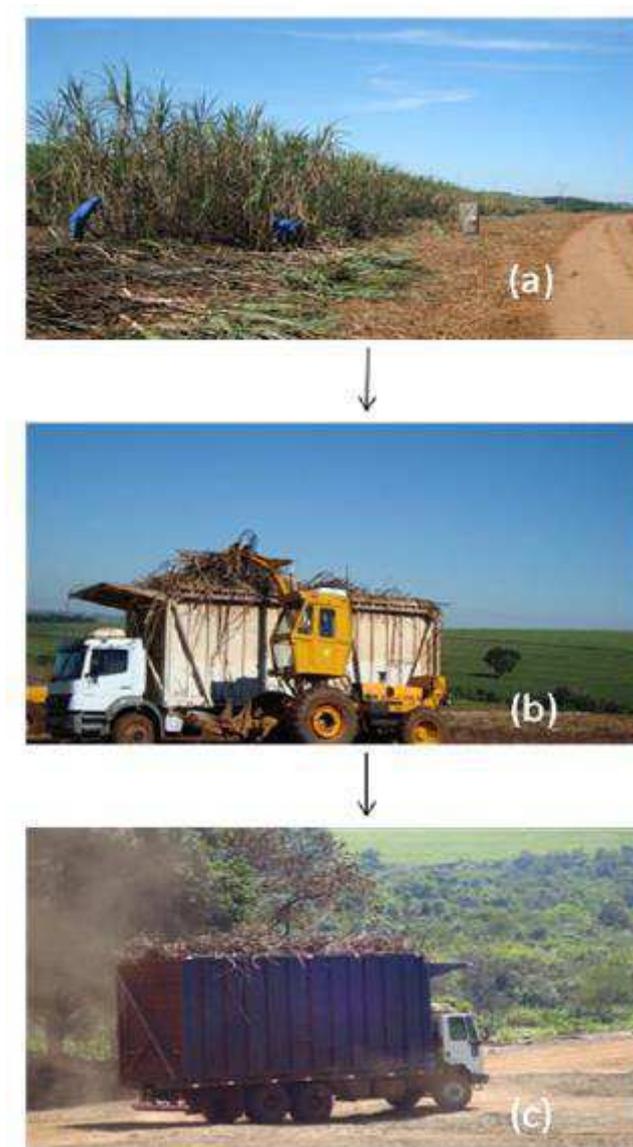


Figura 9 Sistema de Colheita Semi-mecanizado. (a) Corte Manual; (b) Carregamento; (c): Transporte (Oliveira, 2012).

No sistema mecanizado, a matéria-prima é cortada por máquinas, sem a utilização direta da mão-de-obra e da queima controlada da palha, como mostrado na Figura 10.

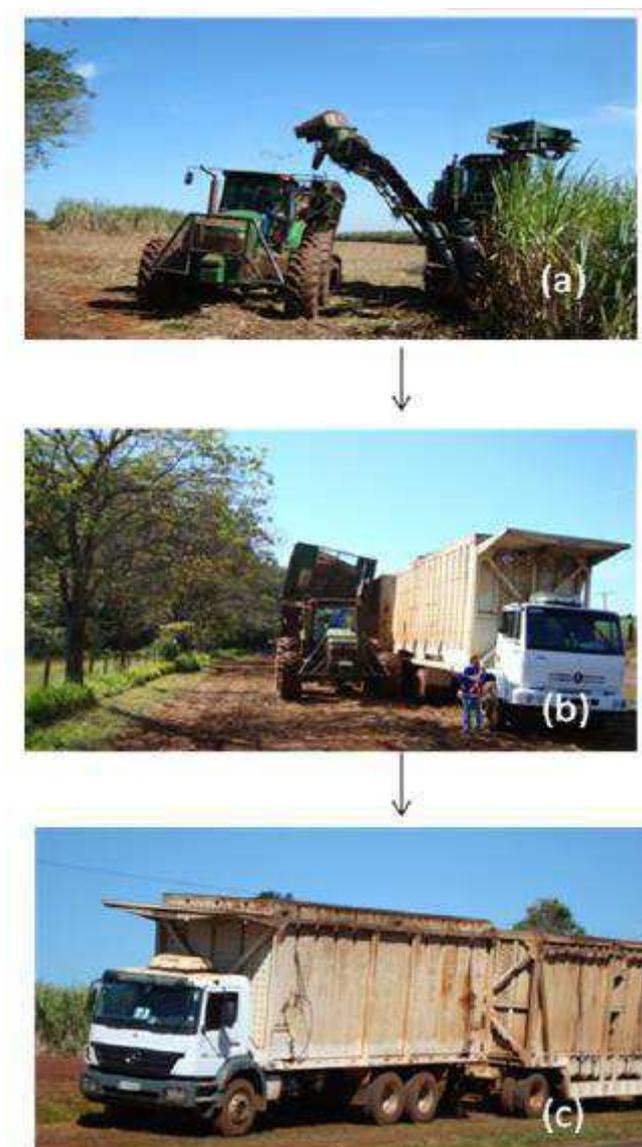


Figura 10 Sistema de Colheita Mecanizado. (a) Colheita mecanizada com colhedora autopropelida e carregamento do transbordo; (b) Descarregamento do transbordo em carretas; (c) Transporte (Oliveira, 2012).

O caldo, o bagaço e o palhiço são os três componentes principais da cana-de-açúcar e apresentam níveis energéticos semelhantes. Apesar do valor energético do palhiço, o processo produtivo está interessado na colheita apenas do caldo e do bagaço da cana.

O palhiço, deixado como resíduo e sem aproveitamento, deve ser separado do colmo para um processamento industrial eficiente do caldo e do bagaço. As características físico-químicas do palhiço aumentam as perdas de sacarose para o

melaço e o bagaço, além de diminuir a qualidade do açúcar e aumentar o custo do processamento. Os processos de colheita, com ou sem queima, tratam em não aproveitar o palhico.

A queima dos canaviais é uma operação de limpeza eficiente e de reflexos econômicos imediatos, porém gera grandes impactos ao meio ambiente e à saúde humana.

Devido às pressões políticas exercidas por organizações não-governamentais e agências ambientais, há um movimento forte que busca acabar com a queima prévia dos canaviais, que tem por finalidade, facilitar o corte da cana-de-açúcar eliminando as folhas e palhas, resultando assim no aumento do desempenho dos sistemas semi-mecanizado e mecanizado de colheita (Azzi, 1967).

Verifica-se, portanto, que o sistema de colheita mecanizado de cana-de-açúcar nos dias atuais é uma realidade dentro da agroindústria brasileira, assumindo então uma importância relevante aos estudos e pesquisas realizados com o tema proposto (Oliveira, 2012).

3.2.2 A PRODUÇÃO DO ETANOL

O etanol fez com que entre 2003 e 2010 o Brasil se convertesse no maior laboratório de desenvolvimento de biocombustíveis no planeta, atingindo a marca de 10 milhões de veículos *flex* nas ruas. Em 2009, o etanol superou pela primeira vez, o consumo de gasolina no país (Oliveira, 2013).

O etanol pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas, tais como as amiláceas (mandioca, batata-doce, milho e outros grãos), celulósicas (madeiras e resíduos agrícolas, dentre os quais destaca-se o bagaço de cana-de-açúcar) e sacarinas (cana-de-açúcar, sorgo sacarino e beterraba) (Corrêa Neto, 2001).

Praticamente todo o etanol produzido no Brasil é a partir da cana-de-açúcar. Dentre os motivos que justificam este fato, destacam-se:

- i. Tradição secular no cultivo da cana-de-açúcar;
- ii. Existência de solos adequados;

iii. A cana-de-açúcar é matéria-prima de álcool e açúcar.

O processo de produção do etanol segue a sequência de atividades: colheita, tratamento da cana, extração do caldo e a produção de etanol propriamente dita. É apresentado, na Figura 11, o esquema genérico de produção do etanol.

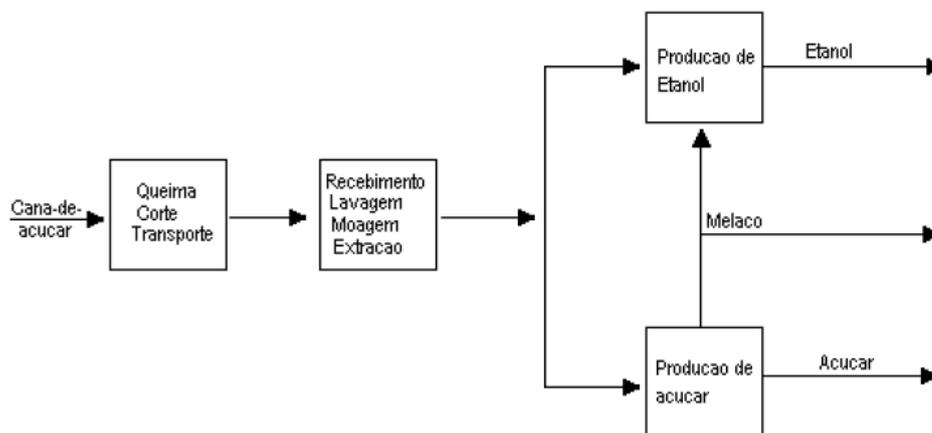


Figura 11 Esquema genérico de produção de etanol (Camargo, Ushima e Ribeiro, 1990).

O esquema geral da produção conjunta de etanol e açúcar a partir da cana é apresentado na Figura 12, onde pode-se ver que a primeira etapa do processamento industrial propriamente dito é a lavagem da cana-de-açúcar, quando se realiza a retirada das impurezas carregadas do campo, principalmente areia, argila, palha e pedras.

Em seguida se realiza o preparo da cana-de-açúcar através das facas rotativas e os desfibradores. As facas rotativas proporcionam a obtenção de um colchão de cana-de-açúcar de espessura quase uniforme e são divididas em niveladoras, que regularizam e uniformizam a carga de cana, e as cortadoras que trabalham a seguir. Os desfibradores destroem por completo a estrutura da cana-de-açúcar, proporcionando a desintegração física para facilitar a extração do caldo e, portanto, da sacarose contida nas células (Corrêa Neto, 2001).

A extração do caldo é então realizada nas moendas. A moenda é a unidade esmagadora constituída basicamente por ternos, conjunto de três cilindros com seus eixos posicionados nos vértices de um triângulo isósceles. Para aumentar a extração de sacarose realiza-se a adição de água à cana-de-açúcar após a passagem pelo primeiro terno da moenda, processo chamado embebição (Corrêa Neto, 2001).

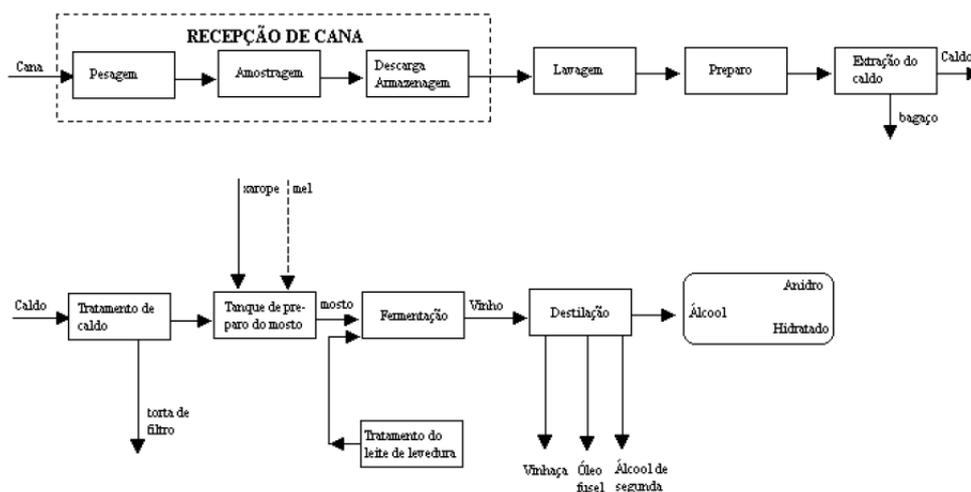


Figura 12 Esquema Geral da produção de etanol e açúcar a partir da cana (Camargo, Ushima e Ribeiro, 1990).

O caldo misto extraído pela moagem, composto pelo caldo da cana-de-açúcar e a água de embebição passa por algumas etapas de tratamento. Na produção de etanol não está definitivamente estabelecida a tecnologia a ser empregada. Algumas unidades já não aplicam nenhum tratamento do caldo misto enviando-o a fermentação após o peneiramento. Outras unidades aplicam após o peneiramento a pasteurização do caldo misto ou seu aquecimento e decantação (Corrêa Neto, 2001).

O tratamento do caldo misto inclui a etapa de peneiramento, decantação e a filtração. Seu objetivo é a retirada de impurezas minerais e vegetais em suspensão que desgastam e entopem as centrífugas produzindo perda de levedura, importante na fermentação, e incrustando os equipamentos de processo (Corrêa Neto, 2001).

O caldo misto tratado é enviado à fermentação. O processo de fermentação, conversão dos açúcares em etanol, é normalmente realizado de forma descontínua em tanques denominados dornas. As leveduras e microorganismos unicelulares produzem um conjunto de enzimas que catalisam a reação de fermentação (Corrêa Neto, 2001).

No Brasil emprega-se o processo descontínuo de Melle-Boinot que reutiliza as leveduras após a separação por centrifugação do mosto fermentado em duas frações: o leite de levedura e o vinho delevedurado. O vinho segue para a dorna volante que é o pulmão da destilaria e o leite de levedura é diluído em água e tratado com ácido sulfúrico, retornando ao processo (Corrêa Neto, 2001).

A dorna volante alimenta a destilaria e sua finalidade é purificar e concentrar o álcool obtido na fermentação. A destilaria é constituída por uma série de colunas de destilação, variando em número de acordo com o tipo e a qualidade do álcool desejado.

Após a sequência de colunas de destilação os vapores alcoólicos produzidos através do vapor d'água por troca direta ou indireta são condensados originando o álcool hidratado com 96° GL, o álcool de segunda com 92° GL e subprodutos como a vinhaça, flegmaça e óleo fusel (Corrêa Neto, 2001).

O álcool hidratado com concentração 96° GL é um composto azeótropo que não pode mais ser separado da água por destilação convencional, sendo utilizado o benzeno, benzol comercial, para promover a desidratação final e produzir o álcool anidro (Corrêa Neto, 2001).

3.2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM A BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

Embora a biomassa tenha sido o primeiro vetor energético empregado pela humanidade e ainda seja uma fonte energética de importância, a produção de eletricidade a partir da biomassa é restrita (Walter e Nogueira, 1997).

As fontes renováveis representam 79,3% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (Empresa de Pesquisa Energética, 2014).

A parcela da geração de energia elétrica a partir da biomassa apresenta apenas 7,6% da geração total de eletricidade do país.

Segundo o Balanço Energético Nacional 2014, em 2013 foi produzido um total de 163.142 de milhares de toneladas de bagaço de cana. Deste total, 24.772 milhares de toneladas foram transformadas em energia elétrica.

No caso brasileiro, a geração de energia elétrica a partir da biomassa conta com significativos atrativos:

- i. País de clima tropical, com elevada taxa de insolação ao longo de todo ano;
- ii. Grande extensão territorial, permitindo a existência de culturas energéticas sem exercer pressão sobre a área de plantio alimentar;
- iii. Potencial de produção alimentar com significativa presença de resíduos vegetais;
- iv. Manutenção do perfil renovável da geração elétrica brasileira;

- v. A exaustão dos potenciais hidroelétricos das bacias hidrológicas mais próximas dos grandes centros consumidores, elevando os custos de geração e transmissão da energia elétrica;
- vi. A elevação dos custos de instalações hidroelétricas, principalmente a partir da internalização dos custos ambientais;
- vii. Incremento da participação de unidades termelétricas na matriz de geração, aumentando a flexibilidade do sistema e reduzindo sua incerteza hidrológica.

As principais limitações ao emprego de biomassa na produção de eletricidade são:

- i. Os custos de produção e do transporte da biomassa são determinantes para a viabilidade econômica dos projetos;
- ii. A reduzida eficiência de conversão energética da biomassa em eletricidade e a baixa capacidade unitária dos sistemas, considerando as tecnologias convencionais, que estão praticamente limitadas às instalações de potência a vapor, prejudicam a economicidade e reduzem o interesse em sua implementação;
- iii. Há necessidade de que os benefícios ambientais sejam assegurados em toda cadeia de produção de biomassa e eletricidade;
- iv. Há complexidade, em termos da multidisciplinaridade e da integração dos sistemas que usam biomassa. Essa complexidade deriva da combinação de fatores que não são só técnicos e econômicos, mas abrangem as questões ambientais, políticas, estratégicas, etc.

Tendo em vista a relevância dos aspectos positivos e as perspectivas de eliminação das limitações em um período de médio prazo, vários países têm planos de viabilização de empreendimentos de produção de eletricidade a partir da biomassa.

A aplicação do conceito de cogeração como uma saída eficiente para o problema da reduzida eficiência energética da geração de energia a vapor também proporciona um uso racional da matéria-prima do ponto de vista ambiental. A cogeração é, portanto, uma alternativa viabilizadora dos projetos de geração de energia elétrica a partir da biomassa.

4 TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA

O calor, a eletricidade e combustíveis para transportes são as finalidades das diversas rotas de conversão da biomassa. As diversas rotas exploradas para a conversão em energia podem ser analisadas no diagrama encontrado na Figura 13.

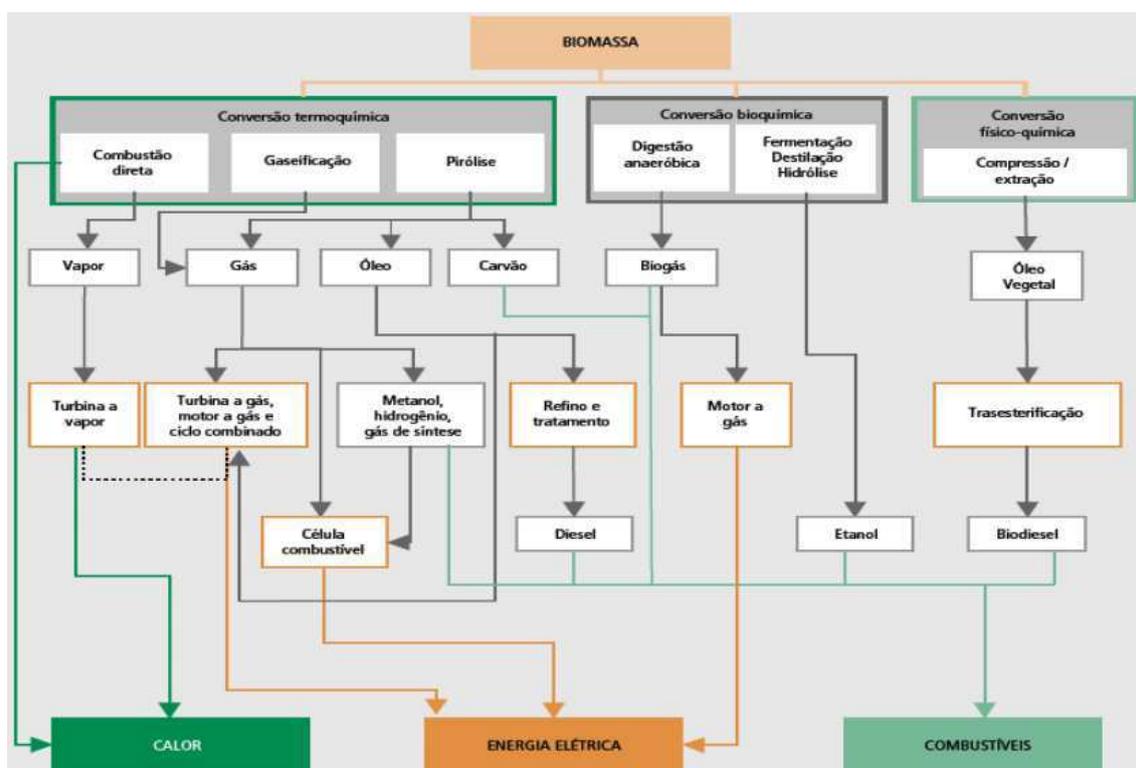


Figura 13 Rotas Tecnológicas para Conversão da Biomassa (Empresa de Pesquisa Energética, 2014).

As alternativas de produção de eletricidade a partir da biomassa incluem a combustão direta da biomassa (tal como disponível) ou sua prévia conversão em combustíveis sólidos (por exemplo, carvoejamento e torrefação), combustíveis líquidos (por exemplo, pirólise, hidrólise e fermentação) ou combustíveis gasosos (por exemplo, gaseificação, digestão anaeróbica). Os processos de conversão da biomassa enquanto insumo primário são classificados como termoquímicos, físico-químicos ou biológicos (Cortez, Lora e Olivares Gómez, 2008).

Do ponto de vista das tecnologias de produção de eletricidade, as rotas tecnológicas possíveis incluem os sistemas baseados no ciclos a vapor (que usualmente empregam combustíveis sólidos), os sistemas baseados em motores de combustão interna (ou mesmo de combustão externa) e em turbinas a gás, inclusive os ciclos combinados (alternativa que requer combustíveis líquidos e gasosos, com determinadas especificações físico-químicas), e os sistemas baseados em células a combustível (Cortez, Lora e Olivares Gómez, 2008).

De modo geral, todas as rotas de conversão de biomassa podem utilizar o conceito de cogeração. As principais vias tecnológicas utilizadas no aproveitamento elétrico da biomassa serão apresentadas resumidamente neste capítulo.

4.1 CICLOS COM TURBINAS A VAPOR

A geração termelétrica nas usinas de açúcar e álcool é tradicionalmente realizada em ciclos *Rankine* de contrapressão (Corrêa Neto, 2001).

A característica que mais diferencia o ciclo *Rankine* dos demais é a combustão externa ao fluido de trabalho. Com isso, pode-se utilizar qualquer tipo de combustível, sólido, líquido ou gasoso (ex: bagaço de cana, madeira, lixo, óleo diesel, gás natural) (Barja, 2006).

O ciclo inicia-se com o bombeamento ou pressurização da água que, como fluido de um circuito fechado, segue à caldeira. A biomassa, queimada nas caldeiras, produz energia térmica na forma de calor, que transferido à água, gera vapor (etapa de superaquecimento). O vapor, a alta pressão e temperatura, é expandido na turbina e sua energia é convertida em cinética no momento da expansão. Em seguida, as pás do rotor convertem essa energia em trabalho no eixo, que, por conseguinte, realiza a conversão eletromecânica e, portanto, a geração de eletricidade. Na sequência a água condensada é bombeada novamente à caldeira, fechando o ciclo.

O esquema genérico de um ciclo com turbina a vapor pode ser visualizado na Figura 14.

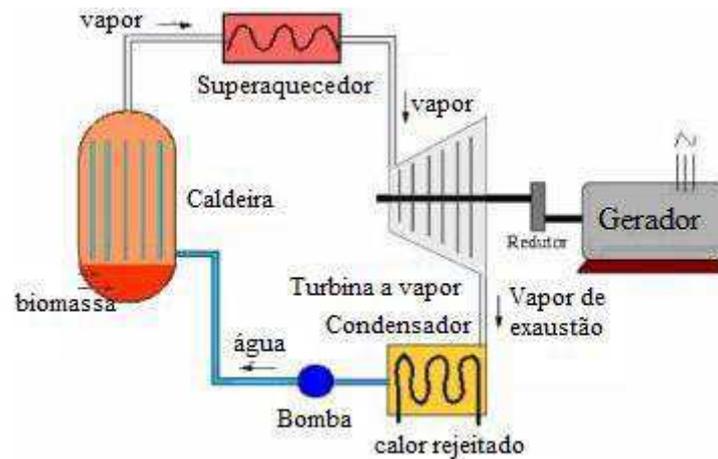


Figura 14 Esquemático de geração com ciclo a vapor *Rankine*

A potência destes ciclos geralmente é encontrada em valores de 0,5 a 100 MW, podendo chegar a 1.350 MW (Angra II), com um rendimento típico em torno de 35%. Outra vantagem se apresenta em consequência das baixas temperaturas encontradas no fluido de trabalho, sendo uma tecnologia dominada e com opções de fabricantes nacionais. Uma desvantagem deste sistema apresenta-se na operação pouco elástica em relação aos regimes de carga, devido às condições de compromisso com o ponto de trabalho termodinâmico do vapor (Barja, 2006).

Em seguida são mencionadas as principais vantagens da cogeração com turbinas de vapor.

- i. Tempo de vida útil elevado;
- ii. Não necessita de vigilância constante;
- iii. Equipamento seguro;
- iv. Eficiência global elevada;
- v. Capacidade de fornecer vapor a alta pressão e/ou pressão atmosférica;
- vi. Elevado tempo de trabalho entre manutenções.

Dentre as desvantagens, destacam-se:

- i. Reduzido numero de aplicações;
- ii. Baixo rendimento elétrico;
- iii. Arranque lento;
- iv. Problemas de controle de emissão de poluentes;

- v. Dependência de um tipo de combustível no dimensionamento, ou seja só pode usar o combustível idêntico aquele para que foi projetado o sistema;
- vi. Investimento inicial elevado;

4.1.1 CICLOS A VAPOR COM TURBINAS A CONTRAPRESSÃO

Neste arranjo de termelétricas, com turbinas a contrapressão, o condensador é substituído pelo próprio processo industrial.

A eficiência energética relativamente baixa e a baixa capacidade de geração são características deste sistema. São apresentados na Tabela 1 os principais indicadores destas unidades. Um esforço significativo está sendo desenvolvido para viabilização de projetos mais robustos e eficientes.

Tabela 1 Características Técnicas dos Ciclos Tradicionais de Contrapressão (Corrêa Neto, 2001).

Temperatura de Operação (°C)	280 a 350
Pressão de Operação (Mpa)	2,0 a 3,0
Produção de Calor (kg/ton _{cana})	350 a 500
Produção de Eletricidade (kWh/ton _{cana})	15 a 25
Eficiência Térmica (%)	20 a 25
Escala até (MW)	25

A baixa densidade, alta umidade e baixo poder calorífico da biomassa como combustível em sua forma direta são fatores que contribuem para a baixa eficiência energética destes sistemas. A baixa densidade energética e a sua alta dispersão no processo de geração afetam a capacidade de geração, uma vez que seria necessário um grande porte do sistema para uma geração maior, o que inviabiliza o projeto devido às logísticas e aos custos.

Capacidades típicas de termelétricas a biomassa estão na faixa de 25 a 50 MW, com poucas plantas com capacidade da ordem de 70 a 80 MW. Em função da menor capacidade, e para que os custos não se tornem proibitivos, opta-se pela redução da pressão e da temperatura do vapor gerado, o que implica perdas de rendimento térmico. Os rendimentos alcançados na produção de eletricidade variam entre 20% a 25% nas termelétricas a

biomassa e são ainda menos nas instalações de cogeração (Cortez, Lora e Olivares Gómez, 2008).

O uso mais eficiente da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar passou a ser objetivo das indústrias do ramo e tecnologias mais eficientes para o aproveitamento deste combustível passaram a ser exigidas e desenvolvidas nas últimas décadas.

4.1.1.1 MODIFICAÇÕES DOS SISTEMAS TRADICIONAIS A VAPOR A CONTRAPRESSÃO

Diversas maneiras podem ser utilizadas para a melhoria da eficiência energética de modo a aproveitar de modo mais racional o poder energético da matéria-prima em sistemas a vapor a contrapressão.

A interferência mínima possível seria a substituição dos atuais acionadores mecânicos, turbinas a vapor de simples estágio e baixa eficiência por turbinas de múltiplos estágios e maior eficiência. A substituição das atuais caldeiras de 2,0 MPa por caldeiras de 8,0 MPa e a substituição dos turbogeradores de contrapressão por turbogeradores de contrapressão e extração configuram a interferência mais profunda que permitiria a manutenção dos atuais ciclos de contrapressão (Corrêa Neto, 2001).

Sem a presença de condensadores nestes ciclos, a geração de energia elétrica só poderá ser desenvolvida em períodos de safra, logo a geração é sazonal. Esta sazonalidade não é interessante para o Setor Elétrico Brasileiro, que demanda energia elétrica a todo tempo, tampouco ao próprio Setor Sucroalcooleiro, que passa a receber menos por unidade de energia quando esta está disponível.

Dentre os tipos de investimentos para melhoria do potencial desse tipo de geração, destacam-se:

- i. Substituição dos turboacionadores de simples estágio por turboacionadores de múltiplos estágios, mantendo as caldeiras e adquirindo novos turbogeradores para aproveitamento do vapor disponibilizado na geração de energia elétrica;
- ii. Substituição dos turboacionadores de simples estágio por turboacionadores de múltiplos estágios com vapor a 2,1 MPa e 280 °C, substituição das caldeiras por caldeiras de geração de vapor a 8,5 MPa e 525 °C e a aquisição de turbogeradores de contrapressão e extração,

operando com vapor de 8,5 MPa, extração a 2,1 MPa e contrapressão a 0,25 MPa.

Este processo está maduro do ponto de vista comercial e é o mais disseminado atualmente. O Brasil conta, inclusive, com diversos produtores nacionais da maior parte dos equipamentos necessários (Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, 2008).

4.1.2 CICLOS A VAPOR COM TURBINAS DE CONDENSAÇÃO E EXTRAÇÃO

Neste arranjo, com a turbina em condensação (onde há o condensador), porém diferentemente do tipo a contrapressão, o vapor destinado ao processo industrial é extraído em estágios intermediários da turbina, ou recuperado do condensador, e posteriormente retornado ao ciclo na forma de condensado.

Consiste na condensação total ou parcial do vapor ao final da realização do trabalho na turbina para atendimento às atividades mecânicas ou térmicas do processo produtivo (Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, 2008).

Esta configuração possui seu esquemático similar ao caso anterior. O nome desta configuração refere-se à condensação do vapor ao final do trabalho realizado pela turbina e à parcela de vapor que é extraída da turbina para alimentação das necessidades térmicas e mecânicas da planta industrial.

A mais notável diferença entre esta via tecnológica e o ciclo com turbinas a contrapressão é que as turbinas de condensação são turbinas onde a pressão de saída do vapor é menor que a atmosférica, sendo neste caso necessário o acréscimo de um condensador. A existência de um condensador na saída da turbina proporciona maior flexibilização na geração de energia elétrica. A adequação de níveis de temperatura para aquecimento da água que vai à caldeira proporciona aumento na eficiência global da geração.

A instalação desta rota exige investimentos maiores aos requeridos na instalação de condensadores simples, necessários no ciclo à contrapressão.

É mostrado na Figura 15 o exemplo de uma instalação industrial de grande porte com geração a partir de turbinas de condensação.



Figura 15 Instalação industrial onde se usa turbinas a vapor. Notar à esquerda caldeira de condensação, uma das maiores do mundo (Matimba, África do Sul).

4.2 CICLOS COM TURBINAS A GÁS

A geração com turbinas a gás é uma alternativa de geração frente à de vapor, em que a água deixa de fazer parte do ciclo termodinâmico. Turbinas a gás são normalmente utilizadas em geração a ciclos combinados com turbinas a vapor. Esta configuração será tratada em uma seção posterior.

Esta máquina térmica trabalha em ciclo *Brayton* aberto (entretanto existem ciclos de realimentação), em que a turbina realiza a conversão eletromecânica a partir da energia cinética de gases provenientes da queima contínua de um combustível (vide FIGURA). Este sistema é largamente utilizado em instalações em que se deseja calor residual para alimentação de processos industriais ou grande quantidade de energia elétrica para ser gerada.

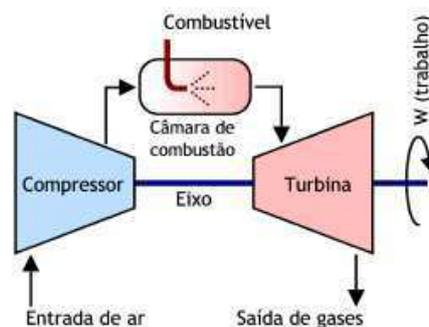


Figura 16 Esquema genérico de um Ciclo *Brayton*.

A turbina a gás consiste numa máquina de combustão interna de construção compacta, e que apesar do nome pode utilizar uma diversidade de combustíveis tanto líquidos quanto gasosos. A denominação de “turbina a gás” foi dada por consequência do seu fluido de trabalho – o ar. Na verdade, trata-se de uma máquina composta por diversos elementos, resumidamente pelo compressor, câmara de combustão e turbina (Barja, 2006) (vide Figura 17).

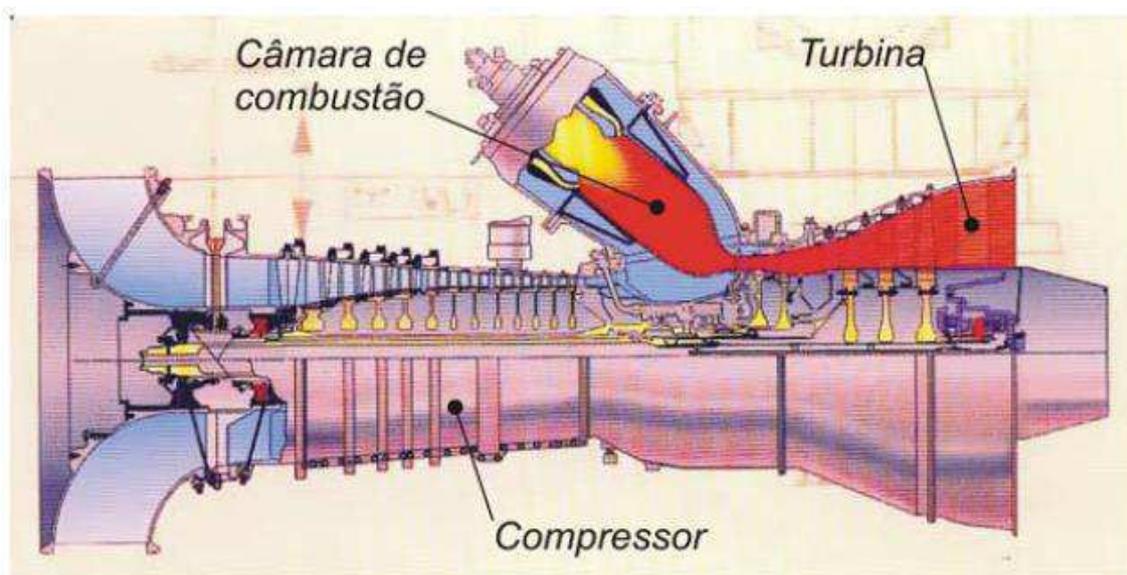


Figura 17 Turbina a gás Allison 601-KB9, de 6,5 MW (Rolls-Royce Energy Systems, 1998) (apud (Barja, 2006)).

O compressor (vide Figura 17) realiza a sucção do ar atmosférico e o comprime a alta pressão, direcionando-o para a câmara de combustão. O ar comprimido entra na câmara de combustão e é misturado com o combustível, permitindo a combustão, que resulta no gás de combustão com elevada temperatura e energia.

Os gases de combustão são direcionados à turbina (vide Figura 17), onde se expandem, extraindo assim, energia cinética. Esta expansão é suficiente para acionar o gerador através do contato, sob pressão, dos gases com as pás do rotor. Este passa a manter um torque eletromecânico, possibilitando, portanto, a conversão eletromecânica e finalmente a geração de energia elétrica.

Para maximizar a eficiência do sistema, parte do ar comprimido que não foi misturado com os combustíveis é utilizada para resfriamento de áreas quentes da turbina. Após a refrigeração, os gases refrigerantes se encontram com os gases de combustão e são encaminhados juntos para a exaustão. Os gases de exaustão, por serem

relativamente limpos e pouco húmidos, podem ser reaproveitados em processos de secagem industrial entre outras necessidades da planta.

Quanto à eficiência energética deste tipo de sistema, pode-se considerar que é bastante boa, não sendo como é óbvio de 100%, uma vez que como é sabido tal sistema é virtualmente impossível. No entanto o uso de Turbinas a Gás na **Cogeração** proporciona uma **eficiência global** de aproximadamente 75% que se pode justificar do seguinte modo: da energia total intrínseca ao combustível utilizado na combustão, cerca de 30% é convertida em energia mecânica, aproximadamente 50% encontra-se contida nos gases de exaustão (que são expulsos a temperaturas da ordem dos 500-600 °C), parte da restante energia (cerca de 20%) é absorvida pelo sistema de refrigeração, sendo o resto perdido no meio ambiente (Brandão, 2004).

O fato de se trabalhar com temperaturas elevadas e altas pressões implica o uso de materiais mais sofisticados, e a implementação de sistemas mais complexos, de modo a maximizar o desempenho/rendimento do sistema.

Este tipo de tecnologia é mais habitualmente utilizado em sistemas de médio e grande porte com potência instalada de 40kW a 250MW com exigência de suprimento constante. Destacam-se como exemplos de aplicações desta rota as produções de energia nos setores alimentar, petroquímico e papelero.

A título de exemplo de uma indústria alimentar, é destaque a indústria da cerveja. Na Figura 18 seguinte encontra-se um sistema de duas turbinas a gás com uma potência de 5,2 MW cada (10,4 MW total) utilizado numa fábrica de cerveja no Brasil. Na Figura 19, o sistema é constituído por três turbinas de 4,9 MW cada, totalizando 14,7 MW de energia produzida.



Figura 18 Sistema de turbinas a gás (Fábrica da Cerveja Kaiser - Brasil) (apud (Brandão, 2004)).



Figura 19 Sistema de turbinas a gás (Fábrica de Cerveja Brahma -Brasil)(apud (Brandão, 2004)).

Na cogeração utilizando turbinas a gás destacam-se as seguintes vantagens:

- i. Manutenção simples (menores tempos de paragem);
- ii. Elevada fiabilidade;
- iii. Baixa poluição ambiental;
- iv. Não necessita de vigilância permanente;
- v. Disponibiliza energia térmica a temperaturas elevadas (500° a 600°);
- vi. Unidades compactas e de pequeno peso;

- vii. Arranque rápido;
- viii. Baixo nível de vibrações.

E como desvantagens:

- i. Limitado a nível de variedade de combustível consumido;
- ii. Tempo de vida útil curto;
- iii. Ineficácia em processos com poucas necessidades térmicas;
- iv. Necessidade de uso de dispositivos anti-poeiras/sujidade, anti-corrosão (em especial em casos de pausas de funcionamento prolongado).

4.3 CICLOS COMBINADOS

A evolução da tecnologia e o aumento da necessidade do aproveitamento racional de nossos recursos colaboraram para a criação de projetos de geração cada vez mais eficientes.

A intenção dos ciclos combinados é integrar dois ou mais ciclos de modo a reduzir ao máximo as perdas energéticas, aumentando o rendimento global da planta.

O princípio do ciclo combinado é o mesmo da cogeração, caracterizado pela utilização racional da rejeição térmica de uma máquina por outra. A combinação mais encontrada é o arranjo entre os ciclos *Brayton* (com turbinas a gás) e o ciclo *Rankine* (com turbinas a vapor).

Na configuração *Brayton-Rankine* os gases de exaustão das turbinas (ciclo *Brayton*) com temperaturas superiores a 550°C são aproveitados para o aquecimento da água na caldeira do ciclo a vapor (ciclo *Rankine*). O rendimento elétrico é aumentado para os 60%, frente aos 35%, caso os mesmos estivessem operando em separado.

Considerando a baixa temperatura utilizada na maioria dos processos industriais, a cogeração em ciclos combinados, em geral, não recupera calor dos gases de exaustão da turbina a gás, mas sim mediante extrações intermediárias da turbina a vapor, bem como no calor rejeitado pela mesma no condensador. O resultado disso são sistemas de cogeração com eficiências totais que podem chegar a valores de 85% (Barja, 2006).

A Figura 20 serve como ilustração de como se dá a geração de energia elétrica no ciclo combinado. Nota-se que há apenas uma entrada de combustível, que ocorre na geração a gás e que a entrada no ciclo a vapor é a própria exaustão do primeiro ciclo.

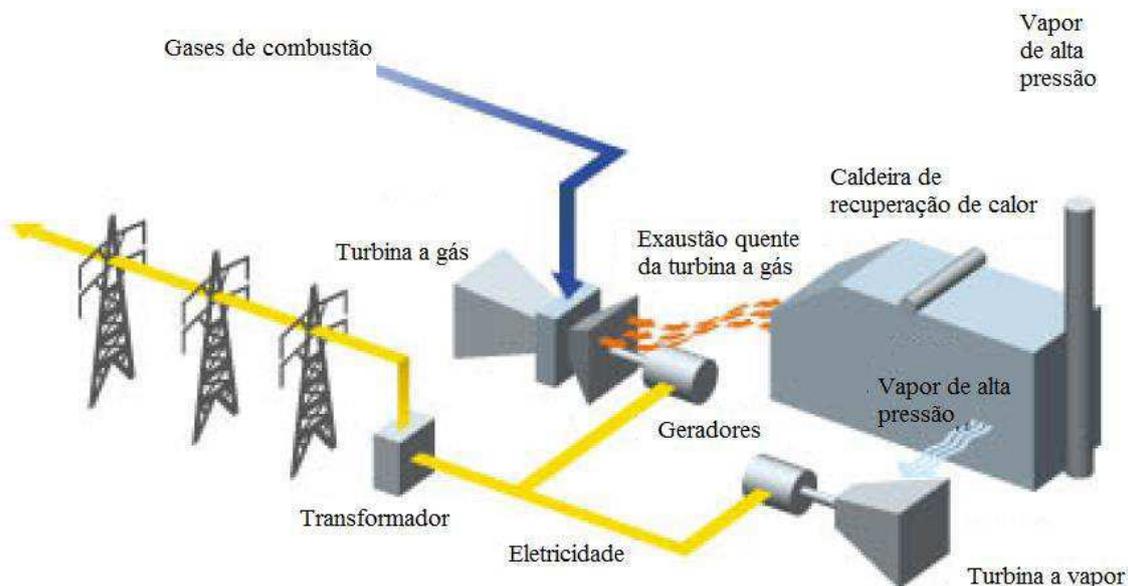


Figura 20 Esquema generalizado de um sistema com ciclo combinado (adaptado de (Brandão, 2004))

Na Cogeração com Turbinas a Gás, verifica-se que os gases de exaustão contém ainda uma grande quantidade de oxigênio (aproximadamente 15%) que pode ser utilizado para uma queima suplementar de combustível numa caldeira de recuperação produzindo-se vapor de alta pressão. Estes gases de exaustão, uma vez que se encontram ainda a elevadas temperaturas (normalmente entre os 450 e 550°C) podem ser usados de forma diferente da descrita no processo anteriormente. Este segundo método consiste em aproveitar o calor destes gases para produzir vapor numa caldeira de recuperação, sem haver queima suplementar (Brandão, 2004).

A utilização do ciclo combinado é empregada em situações em que se deseja maximizar a quantidade de energia em relação ao calor de processo, ou seja, em aplicações em que a demanda de eletricidade seja maior que a demanda de vapor. Como é visto na Figura 20, a energia disponibilizada pelo combustível é aproveitada em dois ciclos termodinâmicos consecutivos, e só então se obtém a parcela de calor.

A Figura 21 serve como ilustração da grandeza de um sistema de cogeração a ciclo combinado de grande porte. Esta central é a TermoRio, com 1.040 MW de capacidade, atualmente a maior central termelétrica do Brasil.



Figura 21 Central Cogeneradora TermoRio, 1.040 MW, Duque de Caxias-RJ. (Foto: TermoRio S.A., 2004)

As turbinas a gás utilizadas na configuração de ciclo combinado, quando comparadas às utilizadas em ciclo simples, possuem eficiência energética inferior, propositalmente afim de que se obtenha temperaturas mais elevadas nos gases de exaustão. O propósito disso é a valorização do ciclo a vapor subsequente, onde a temperatura mais elevada otimiza sua operação, com maior rendimento. Em uma planta de ciclo combinado, o ponto ótimo de operação não necessariamente otimiza cada ciclo em separado (Barja, 2006).

Os sistemas em ciclo combinado apresentam uma grande flexibilidade na relação de produção de eletricidade e calor, face às várias possibilidades de arranjo destes sistemas. Em comparação com grande parte das tecnologias apresentadas anteriormente, a de ciclos combinados permite, de uma maneira geral, uma maior extração de potência por unidade de calor.

As vantagens deste tipo de cogeração a destacar são:

- i. Elevada eficiência;
- ii. Grande flexibilidade na quantidade de energia térmica produzida;
- iii. Redução de custos globais de operação.

Enquanto às desvantagens, tem-se:

- i. Sistema global sujeito a um somatório das desvantagens dos dois sistemas em separado (cogeração com turbina a gás e a vapor);
- ii. Maior complexidade do sistema global.

Conclui-se que o ciclo combinado apresenta-se como boa alternativa para o uso eficiente dos dois ciclos termodinâmicos (*Rankine* e *Brayton*) de forma combinada. Vale lembrar que as desvantagens associadas a cada ciclo separadamente passam a ser somadas. Embora haja a redução dos custos globais de operação, a instalação desta configuração torna-se complexa e em certas ocasiões, passa-se a ser inviável e novas técnicas de cogeração devem ser consideradas.

5 COGERAÇÃO: UMA ALTERNATIVA EFICIENTE

O uso eficiente dos recursos naturais é uma das maiores preocupações da atualidade. A cogeração é uma alternativa para a racionalização dos métodos de geração de energia, colaborando para um melhor aproveitamento dos recursos energéticos nas indústrias.

A cogeração é uma definição específica do conceito de efficientização do processo de geração de energia ou de racionalização de insumos consumidos para a conversão em energia. Cogeração é um termo, acima de tudo, empregado pelo vocabulário energético para designar o sistema que reduz ao máximo o seu desperdício.

O enunciado de *Kelvin-Plank* sobre a Segunda Lei da Termodinâmica diz: “*É impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho.*” A aplicação da cogeração reduz o efeito pessimista enunciado nesta lei de modo a minimizar o calor rejeitado no processo de conversão.

A cogeração pode ser muito viável para algumas indústrias não só por necessitar de um investimento relativamente baixo, mas também por ser capaz de fornecer energia além da demanda interna da empresa, podendo comercializar o excedente da produção para distribuidoras de energia elétrica no país (Oliveira, 2013).

A secretaria do meio ambiente do Governo do Estado de São Paulo (1999) classifica como principais características da cogeração:

- i. Possibilidade de utilização de insumos regionais;
- ii. Diminuição dos impactos ambientais;
- iii. Descentralização dos investimentos e forte participação da iniciativa privada.

Nas termelétricas convencionais, em média apenas 1/3 da energia do combustível é convertida em eletricidade e o resto é convertido em calor rejeitado no processo geração (vide Figura 22).

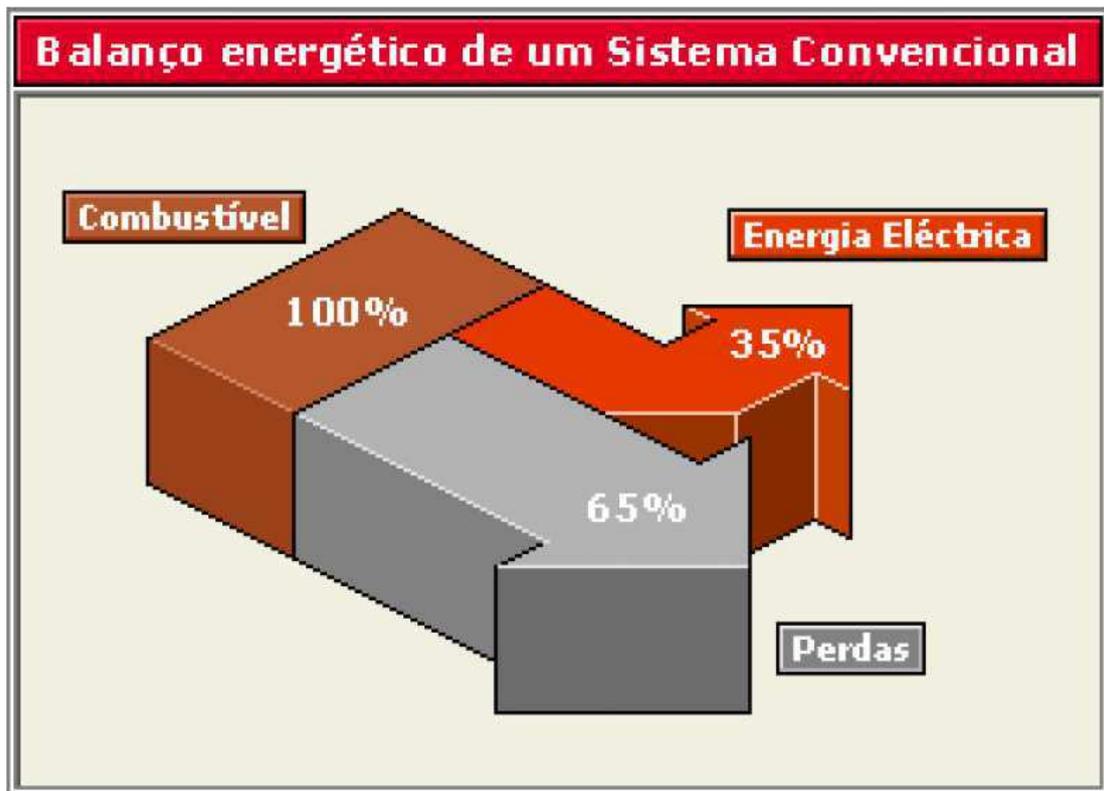


Figura 22 Balanço energético de um sistema convencional de geração termelétrica (Marçal, 2010).

Segundo (Marçal, 2010), diferentemente do sistema convencional, na cogeração o percentual de desperdício é de 15%, os outros 50% são transformados em energia térmica, praticamente toda a energia contida no combustível é utilizada de forma útil. Conforme se infere da Figura 23.

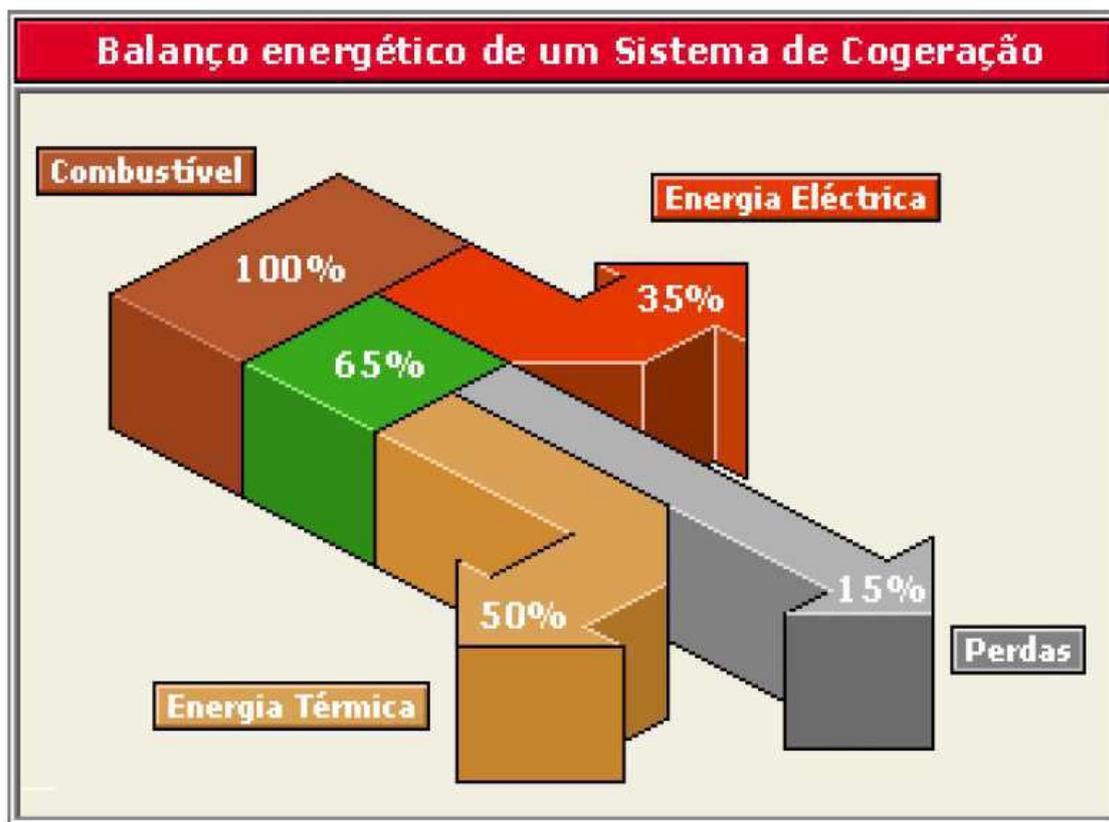


Figura 23 Balanço energético de um sistema de geração termelétrica utilizando a cogeração (Marçal, 2010).

5.1 HISTÓRICO DA COGERAÇÃO NO BRASIL

Como já foi mencionado neste trabalho, o conceito de cogeração se baseia na ação de redução de desperdício de modo a melhorar o rendimento global da planta cogeneradora.

Estudos datam que a primeira tentativa de racionalizar os insumos energéticos de um processo de conversão de energia foi quando *James Watt* recebeu uma máquina de vapor de *Newcomen* para ser consertada (1763) e proporcionou grandes avanços na concepção da eficiência energética.

Historicamente se buscou, na redução do consumo de insumos energéticos, a redução de custos e a maximização dos lucros. No entanto, é necessário custos de investimentos, ou seja, a redução dos gastos com consumo custa dinheiro.

As crises internacionais de petróleo forçaram o mundo a se preocupar com a independência dos países produtores desta fonte de energia. A crise de 1979, em

especial, motivou o Brasil a intensificar ações de racionalização energética de modo a suprimir os desperdícios. Programas de conservação de energia e incentivos à redução do consumo de petróleo e seus derivados foram criados nesta época, acarretando no incentivo à geração distribuída no país.

Algumas causas motivaram o Brasil ao incremento da geração distribuída em seu setor elétrico:

- i. Aumento das tarifas de eletricidade, considerando o aumento da participação das termelétricas na matriz energética, além dos custos de importação de equipamentos e tarifas do gás natural;
- ii. A vontade, por parte dos consumidores, de reduzir os custos do suprimento de energia elétrica;
- iii. Disponibilidade crescente do gás natural;
- iv. A reestruturação do setor elétrico brasileiro com a legalização, por parte da ANEEL, da venda de energia excedente;
- v. Conscientização dos problemas ambientais;
- vi. Aperfeiçoamento de tecnologias que proporcionaram competitividade a novas formas de geração;
- vii. Desenvolvimento da eletrônica e das técnicas de controle e transmissão de dados, tornando mais eficiente a operação, manutenção e fiscalização do setor elétrico.

Um breve resumo do histórico da cogeração pode ser observado no quadro da Tabela 2.

Tabela 2 Breve Histórico da Cogeração
(Avellar, 2000)

1350	Ilustrações alemãs sobre sistemas de elevação a partir de gases quentes (<i>smokejaks</i>).
Século 14	Introdução dos <i>smokejaks</i> , sendo basicamente uma “turbina” movida por ar quente que sobe por uma chaminé, na Europa a partir das ilustrações alemãs de 1350.
Século 16	Diversas referências sobre o emprego dos <i>smokejaks</i> na Alemanha e na Itália.

1685	O inglês John Evelyn descreve um <i>smokejaks</i> instalado em sua residência há mais de cem anos.
1758	Benjamin Franklin sugeriu o uso de <i>smokejaks</i> para produzir energia no verão a partir da ventilação natural das chaminés.
1870	Início do desenvolvimento moderno da cogeração, com máquinas a vapor de eixo alternativo, acopladas a geradores elétricos em áreas urbanas de alta densidade populacional.
1909	Nos estados Unidos, existência até essa data de 150 sistemas de aquecimento de ambientes (<i>district heating</i>).
1920-1930	Desenvolvimento de sistemas de aquecimento de ambientes, principalmente no Norte Europeu.
1970-1980	Grande impulso à cogeração devido à crise do petróleo.
1978	Publicação nos estados Unidos do PURPA (<i>Public Utilities Regulatory Policy Act</i>). O PURPA abriu novos horizontes na medida em que introduziu a noção de competição em mercado aberto de energia elétrica.
1987	Início da cogeração no Brasil.
1993	No Brasil, o Decreto 915 autoriza a formação de consórcios para cogeração de energia elétrica.

Grandes empresas brasileiras vêm se tornando autossuficientes em produção de energia com a ajuda do gás, ou do próprio lixo industrial. O material que antes era descartado pela indústria de celulose passou a ser utilizado como combustível para aquecer as caldeiras. A fábrica da Coca-Cola, em Jundiaí (SP), usa o gás natural para produzir energia elétrica, água quente e gelada, gás carbônico, nitrogênio e ar comprimido.

Tais empresas, na sua maioria, estão utilizando sistemas de cogeração para suprir sua demanda de energia elétrica, utilizando o vapor remanescente para seus processos produtivos, e vendendo para a rede elétrica a eletricidade excedente.

Outro benefício é a possibilidade de se utilizar fontes de energia renováveis como a biomassa. Um exemplo bastante forte no Brasil deste caso ocorre com as usinas de beneficiamento de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, das quais algumas utilizam sistemas de cogeração no processo de beneficiamento da cana e o excedente de energia é vendido. O detalhe é que o combustível utilizado para gerar energia elétrica é

o próprio bagaço da cana. O que antes era um rejeito no processo passou a se integrar no ciclo produtivo, trazendo grande economia para as empresas.

5.2 SEQUÊNCIA DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA – OS

CICLOS *TOPPING E BOTTOMING*

Os sistemas de cogeração são separados em dois grandes grupos de acordo com a sequência da utilização energética, podendo ser classificados como *Topping Cycles* (configuração a montante) ou *Bottoming Cycles* (configuração a jusante).

5.2.1 CICLOS *TOPPING*

Em sistemas que utilizam o ciclo *Topping*, a energia fornecida com a queima do combustível é primeiramente direcionada para a produção de energia elétrica ou mecânica e o calor rejeitado é reaproveitado sob a forma de calor útil em processos da planta. São requeridas temperaturas médias ou baixas, por isso possui uma grande variabilidade de aplicações. Encontram-se faixas dos valores de temperaturas utilizadas para este tipo de ciclo na Figura 24.

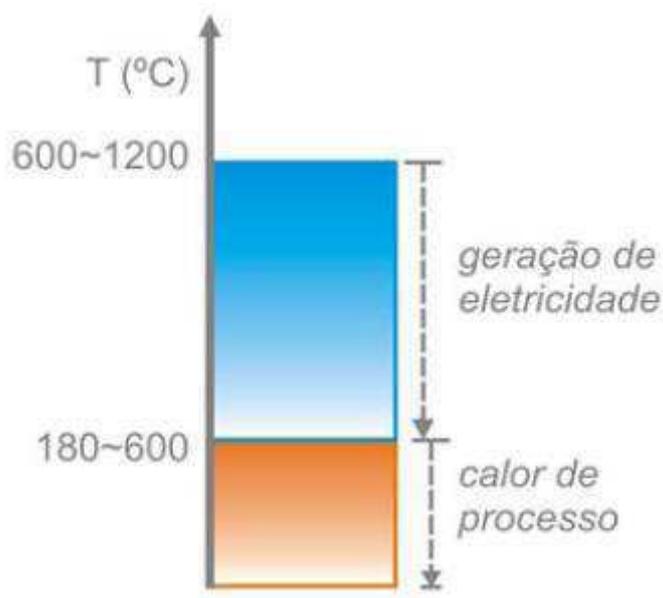


Figura 24 Faixas de temperaturas do ciclo *topping* (adaptado de (COGEN EUROPE, 2001)).

Segundo (Carvalho, Nogueira e Teixeira, 2004), a faixa de valores habitual para utilização de calor nas indústrias está entre 120 e 200°C, que é uma temperatura típica para processos de secagem, cozimento, evaporação etc. A geração elétrica trabalha em níveis mais elevados de temperatura, entre 400 e 950°C.

Sabendo que a temperatura de rejeição da geração termelétrica encontra-se mais elevada que a temperatura encontrada nos processos industriais é racional que se pense num sistema de cogeração do tipo *topping* (figura 2-6) onde o calor utilizado pelo processo industrial é aproveitado do rejeito da geração elétrica. De fato, esta é a tecnologia empregada na maioria das indústrias, considerando que grande parte dos processos industriais demanda calor a baixas temperaturas (Barja, 2006).

São possíveis Ciclos *Topping* de cogeração aqueles que utilizam como equipamento motores, as turbinas a vapor, turbinas a gás, uma combinação destas, o chamado ciclo combinado ou motores de combustão interna (Pinto, Martone e Cardoso, 2001).

Tem-se nas Figura 25 e Figura 26 diagramas ilustrativos básicos de um sistema de cogeração qualquer que utilize o Ciclo *Topping*.



Figura 25 Esquema genérico de um Ciclo *Topping* (adaptado de (Carvalho, Nogueira e Teixeira, 2004)).

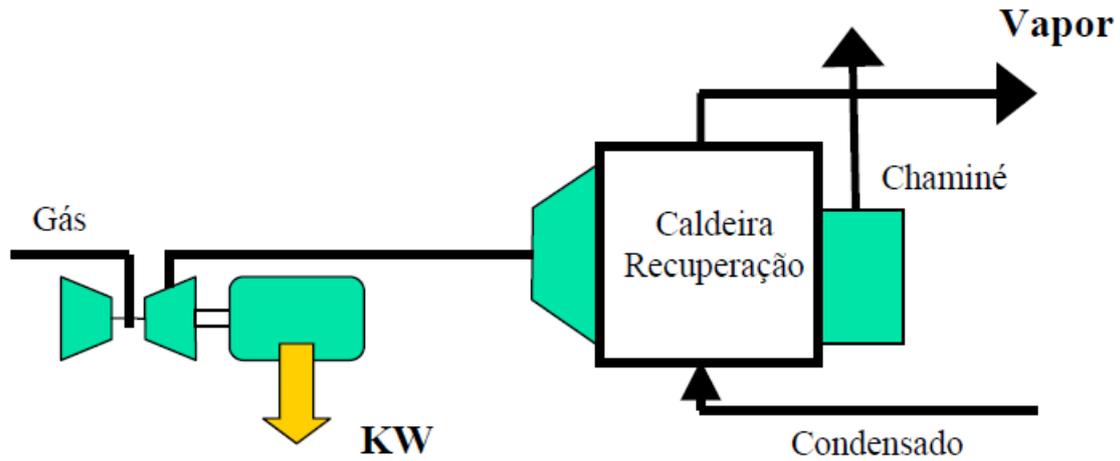


Figura 26 Esquema generalizado para Ciclo *Topping* (Ferrão e Weber, 2001).

5.2.2 CICLOS *BOTTOMING*

Na configuração *Bottoming*, ao contrário do caso anterior, a energia elétrica e/ou mecânica é gerada a partir da exaustão dos processos industriais. A energia térmica rejeitada é proveniente de fornos, fornalhas ou máquinas térmicas e, só então, é recuperada e aplicada a turbogeradores para a produção de eletricidade.

Esse ciclo é geralmente empregado na indústria química, onde o resíduo energético na forma de calor pode atingir temperaturas muito altas favorecendo a conversão. Neste caso, os ciclos a vapor são os mais frequentemente utilizados (Dantas, 2010). As faixas de valores de temperatura para este ciclo estão representadas na Figura 27.

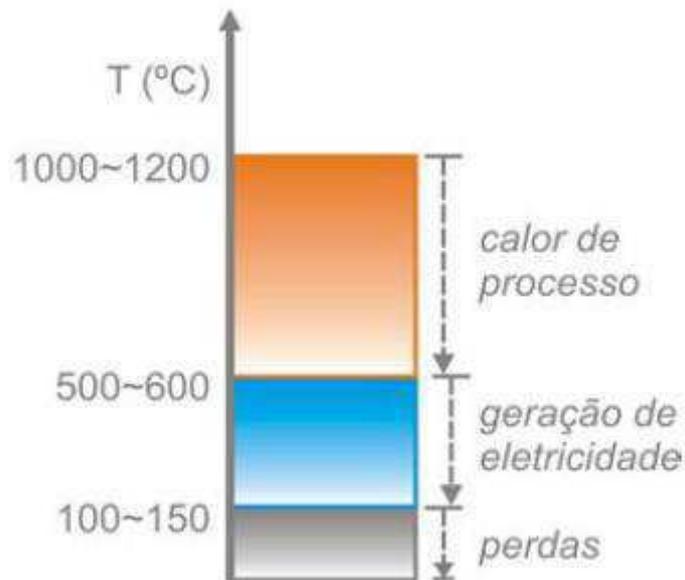


Figura 27 Faixa de temperaturas do Ciclo *Bottoming* (adaptado de (Barja, 2006)).

Alguns processos industriais (siderúrgicas, fornos cerâmicos, cimenteiras, refinarias de petróleo) operam em altas temperaturas, entre 1000~1200°C. Após o processo, os gases de exaustão ainda encontram-se a temperaturas elevadas (500~600°C). Ao invés de descartá-lo diretamente na atmosfera, este calor residual pode ser direcionado a um trocador de calor, para produção de vapor que alimentará uma turbina a vapor. Desta forma, a energia contida no combustível pode ser mais bem aproveitada, com o uso inicial em uma carga térmica e na sequência a produção de eletricidade num ciclo do tipo *bottoming* (Barja, 2006).

Nas Figura 28 e Figura 29 encontram-se diagramas esquemáticos de como se dá a produção de energia e calor útil neste tipo de configuração.

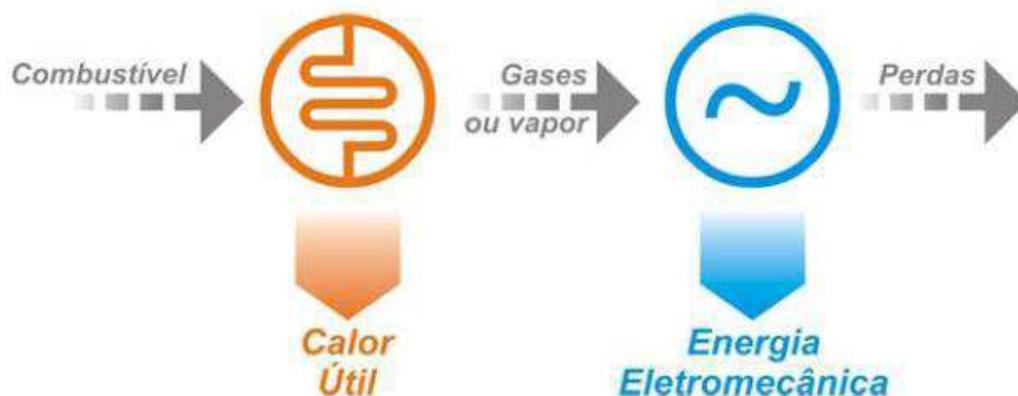


Figura 28 Esquema genérico de um *Bottoming Cycle* (Carvalho, Nogueira e Teixeira, 2004)

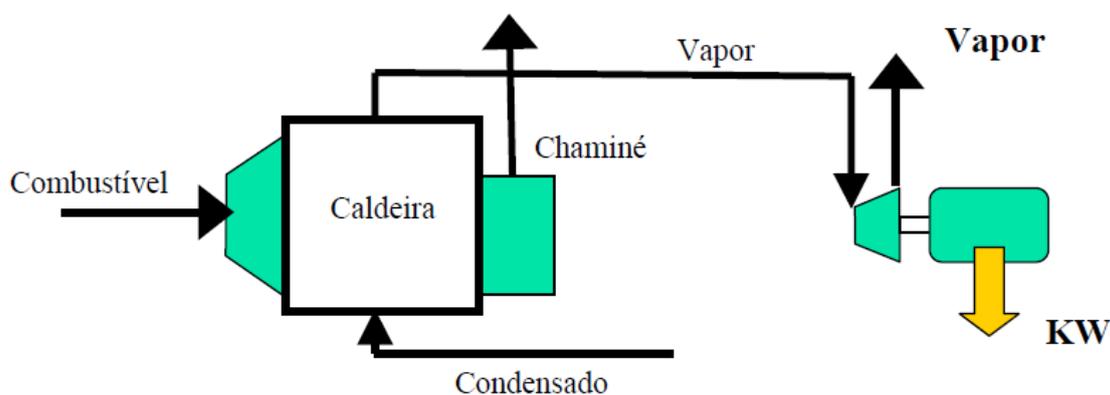


Figura 29 Esquema simplificado para a configuração *Bottoming Cycle* (Ferrão e Weber, 2001).

5.3 BENEFÍCIOS DA COGERAÇÃO

A cogeração é um processo que possibilita a produção de energia de forma muito eficiente, trazendo uma série de benefícios. Um dos principais benefícios diretos que pode ser citado está na autoprodução energética, que gera uma redução da compra de energia, proporcionando uma economia significativa das indústrias. Outro benefício que pode ser citado está na diminuição de gases poluentes ao meio ambiente.

Além do alto desempenho que foi por várias vezes citados neste trabalho, a cogeração tem caráter descentralizador, dada a necessidade de sua instalação próxima ao consumidor.

Não só indústrias sucroalcooleiras são beneficiadas pelo conceito da cogeração. Segundo (Brandão, 2004), no setor terciário a cogeração já provou ser uma solução adequada para uma vasta gama de tipos de edifícios, como hotéis, hospitais, centros de lazer e piscinas, escolas/*campus* universitários, aeroportos, hipermercados e grandes centros comerciais. As vantagens específicas, segundo o mesmo autor, são:

- i. **Economias de energia primária:** A implementação bem sucedida da cogeração conduz a uma redução do consumo de combustível em aproximadamente 25% comparativamente à produção convencional de energia elétrica.
- ii. **Redução de emissões poluentes:** A redução da poluição atmosférica segue a mesma proporção. Com a utilização de da biomassa em vez de combustíveis derivados do petróleo ou carvão, as emissões de SO₂ e partículas são reduzidas a zero.
- iii. **Benefícios econômicos:** As vantagens para o utilizador final também são econômicas. Os custos energéticos das instalações de cogeração são menores do que os das instalações “convencionais”. A título indicativo pode-se dizer que a redução de preços é da ordem dos 20-30%.
- iv. **Aumento da fiabilidade do abastecimento energético:** Pequenas centrais de cogeração de energia elétrica e calor ligadas à rede elétrica garantem uma operação ininterrupta da instalação, no caso de falha do funcionamento da central ou do abastecimento da rede. A nível nacional, favorecem a produção descentralizada, reduzindo a necessidade de grandes centrais termoelétricas.
- v. **Aumento de estabilidade do sistema elétrico:** As unidades de cogeração proporcionam um alívio significativo às redes do sistema elétrico. Cargas de aquecedores são alimentadas por parte da exaustão dos geradores.

5.3.1 VANTAGENS DO BRASIL NO CONTEXTO DA COGERAÇÃO DO BAGAÇO DA CANA

A oferta da biomassa da cana-de-açúcar no Brasil é muito grande, as usinas de açúcar e álcool estão investindo cada vez mais na cogeração, que financeiramente tem gerado um lucro significativo (Oliveira, 2013). Segundo (Rios, 2011), a cogeração representa mais de 15% do faturamento das usinas de açúcar e álcool.

O estado de São Paulo possui a liderança no cultivo de cana-de-açúcar com mais de 50% da produção brasileira (Oliveira, 2013). A Tabela 3 apresenta a quantidade cultivada pelos principais estados em 2012. Pode-se notar também que os estados de Goiás e Minas Gerais cultivam cerca de um milhão e meio de hectares.

Tabela 3 Cultivo da Cana-de-açúcar nos principais estados (safra 2012/2013) (CENBIO, 2012).

Estado	Hectares (mil)	%
São Paulo	4.419,46	51,87
Goiás	725,91	8,52
Minas Gerais	721,86	8,47
Paraná	610,83	7,17
Mato Grosso do Sul	542,70	6,37
Alagoas	445,71	5,23
Pernambuco	327,61	3,87
Demais Estados	726,42	8,5
Total	8.520,5	100

Para (Alcarde, 2013), a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar ajuda a atender a necessidade de energia elétrica do país; contribui para a preservação ambiental por ser uma fonte renovável e por utilizar tecnologia totalmente limpa; contribui para a consolidação do novo modelo de mercado competitivo por ser um novo agente de produção de energia elétrica; maior competitividade no setor sucroalcooleiro e gera empregos para o país. Outra vantagem apontada pelo autor é que a safra sucroalcooleira ocorre no período de estiagens das principais bacias hidrográficas do setor hidrelétrico brasileiro, o que garante a oferta de energia elétrica e viabiliza ainda mais esta alternativa.

Dado o elevado uso da cultura da cana no Brasil, aproveitar de maneira eficiente o bagaço da cana-de-açúcar implica em incremento significativo do uso de fontes

alternativas. A inserção de fontes renováveis na matriz energética proporciona uma maior participação em programas de preservação ambiental e sustentabilidade. Programas estes destinados à redução do lançamento de Gases do Efeito Estufa como o Crédito de Carbono.

5.4 A COGERAÇÃO DO BAGAÇO DA CANA NO BRASIL

A cana-de-açúcar está presente no Brasil desde 1532, liderando a economia pela produção sucroalcooleira por dois séculos. Devido às novas tecnologias, nas últimas décadas, o setor canavieiro vem se reinventando. Vale lembrar que o etanol fez com o Brasil se convertesse no maior laboratório de desenvolvimento de biocombustíveis no planeta.

Em 2012, o Brasil comemorou 25 anos de bioeletricidade. Em 1987, a usina São Francisco, localizada na cidade de Sertãozinho- SP, foi a primeira usina a utilizar o bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica. No mesmo ano, as usinas São Martinho em Pradópolis-SP, e a Vale do Rosário, em Morro Agudo- SP, também começaram a utilizar o sistema de cogeração para o abastecimento elétrico da usina e também a comercialização do excedente para distribuidoras do setor elétrico (UNICA, 2011).

O processo usual de geração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar utilizado é o ciclo *Rankine* com geração com turbinas a vapor. O processo, que já foi descrito neste trabalho, encontra-se resumidamente simplificado pela citação a seguir:

A cana é colhida manualmente ou mecanicamente. Após a colheita, ela é encaminhada para a indústria. A cana passa pela moenda ou difusor para a fabricação de açúcar e álcool. Com a moagem ou difusão, obtém-se como subproduto o bagaço. A partir da obtenção do bagaço, o mesmo é encaminhado para a queima na caldeira onde produz o vapor. Esse vapor é encaminhado para as turbinas localizadas na casa da força, onde será transformada em energia mecânica. Essa por si está conectada aos redutores de velocidade para a conexão com o gerador elétrico, havendo assim a produção de eletricidade (SOUZA, 2003, apud (Basqueroto, 2010)).

A cogeração ocorre no aproveitamento do calor que seria rejeitado por parte do jato de vapor que gira as turbinas, após a geração de energia elétrica. Parte deste calor é aproveitada para alimentação dos processos de produção e de necessidades gerais da planta industrial.

Pode ser verificado na Figura 30 um esquema básico de um processo de cogeração.

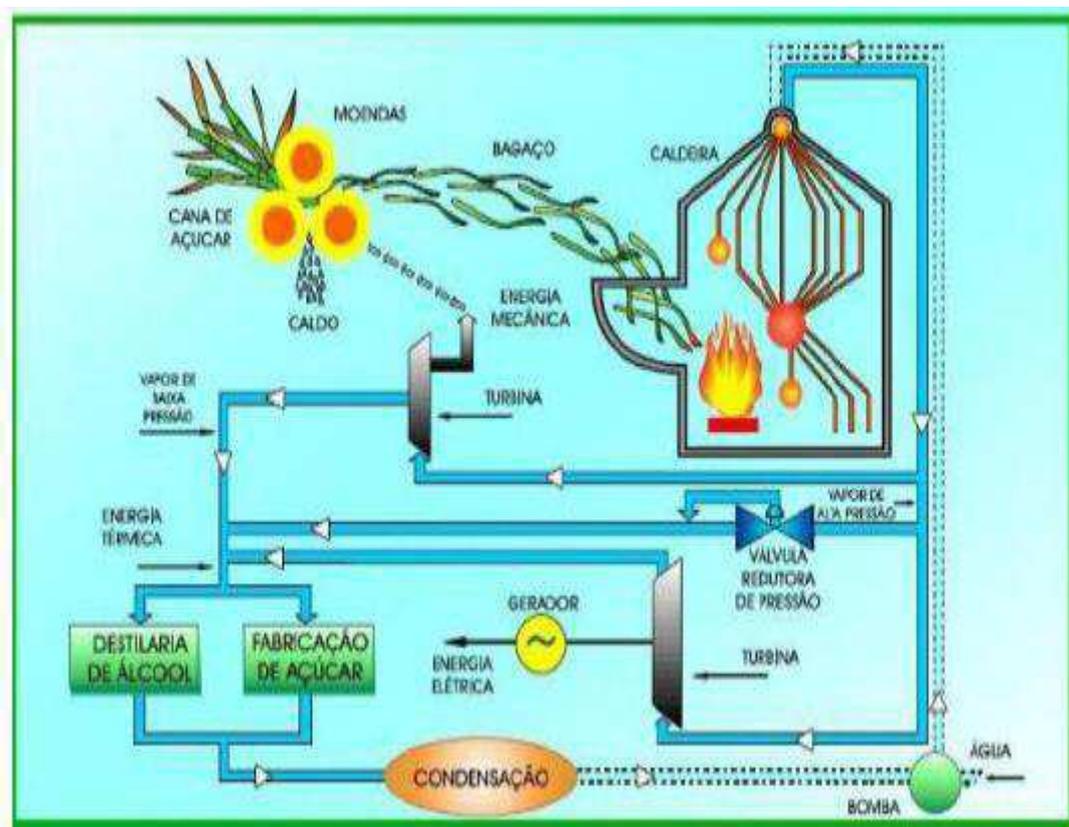


Figura 30 Exemplo simplificado de um sistema de cogeração (Cardoso, 2011).

Pelo que pode ser analisado da figura acima, tem-se, em resumo, o seguinte ciclo:

- i. Após a colheita, a cana-de-açúcar é encaminhada para a indústria seguindo exigências para que não haja perdas significativas de suas propriedades energéticas;
- ii. As moendas recebem a matéria-prima e produzem o caldo para a produção de álcool e açúcar, tendo como subproduto o bagaço da cana;
- iii. Encaminhado para a caldeira, o bagaço é queimado, produzindo energia térmica suficiente para o superaquecimento da água, que se encontra em um circuito fechado, convertendo-a em vapor;

- iv. O vapor é encaminhado para três caminhos:
 - a. O primeiro segue para a turbina geradora de eletricidade e sua exaustão é encaminhada para a alimentação de energia térmica na destilaria de álcool e fabricação de açúcar – plantas do processo produtivo;
 - b. O segundo caminho refere-se ao encaminhamento do vapor para um redutor de pressão e, logo após, para a alimentação também do processo produtivo;
 - c. O terceiro e último seguimento do vapor de alta pressão é o que aciona uma turbina mecânica que realiza o processo de moagem – início do processo produtivo. O resto deste vapor também segue para a planta industrial.
- v. O rejeito global, proveniente da planta industrial, é, portanto, condensado, tornando-se a água que é reencaminhada por uma bomba para a caldeira, fechando o circuito (ciclo).

6 A COGERAÇÃO DA BIOMASSA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR APLICADA NO BRASIL

Desde a década de 80, as usinas brasileiras passaram, de uma posição em que eram auto-suficientes em energia térmica, mas geravam apenas 60% de sua energia elétrica, para uma posição em que são quase auto-suficientes em energia elétrica também. Praticamente toda a energia térmica e aproximadamente 95% da energia elétrica são produzidas na própria usina com sistema de co-geração de bagaço.

Diante todo o embasamento teórico desenvolvido até este ponto, será visto neste capítulo um apanhado geral sobre a cogeração da biomassa do bagaço da cana diretamente direcionado para o contexto brasileiro, abordando desde a regulamentação a exemplos de cogeração no Brasil.

6.1 BREVE HISTÓRICO DA REGULAMENTAÇÃO DA COGERAÇÃO

A regulamentação em que se enquadra a cogeração surgiu em maio de 1981 através do Decreto-Lei nº 1.872. O mesmo decreto autoriza os concessionários de serviço público de eletricidade a adquirir energia elétrica excedente de autoprodutores que geram energia a partir de fontes que não sejam derivadas de petróleo.

O decreto nº 1.872 define energia elétrica excedente como “a diferença entre a geração elétrica que pode ser obtida pela plena utilização da capacidade instalada do produtor e o seu consumo próprio”. Os autoprodutores, em caso de escassez, podem ser obrigados a fornecer energia aos concessionários.

Em setembro de 1996 o Decreto nº 2.003 regulamentou a produção por produtor independente. Produtor independente é aquele que tem concessão ou autorização de produzir energia elétrica com a finalidade de comercializar.

Para (Nagaoka, 2002), a reforma do setor elétrico brasileiro viabilizou a comercialização da energia elétrica excedente do processo de cogeração pelo setor

sucroalcooleiro. Políticas energéticas foram elaboradas e regulamentadas de modo a contribuir para que as indústrias procurassem mais investir nos métodos de cogeração.

Para (Guardabassi, 2006), foi a crise de abastecimento e consequente racionamento de energia de 2001 que impulsionou a geração de excedentes, ação vislumbrada pelo setor a partir de então.

6.2 ESTADO DA ARTE DA COGERAÇÃO

Há no setor sucroalcooleiro, diversas novas tecnologias desenvolvidas e outras em desenvolvimento para suprir as necessidades de aprimoramento da relação desempenho/custo do investimento. Entre as tecnologias do estado da arte da cogeração, ou seja, sobre o que há de mais moderno, estão desde aperfeiçoamentos genéticos da própria cana-de-açúcar a novas utilidades ou formas de aproveitamento desta matéria-prima.

6.2.1 VARIEDADES DA CANA

Existem quatro programas de melhorias genéticas da cana-de-açúcar que já produziram mais de quinhentas variedades comerciais, por meio de técnicas convencionais. Esses programas são capazes de continuar suprindo os produtores de cana com novas variedades, mais produtivas, mais resistentes às doenças e mais adaptadas aos novos ambientes de produção. No entanto, essa tecnologia é cara e demorada, levando em média 12 anos para produzir uma nova variedade.

6.2.2 GENOMA DA CANA

Iniciado em 1988, o programa já identificou cerca de 40 mil genes da cana-de-açúcar com o intuito de descobrir aqueles envolvidos com o desenvolvimento, a produção e o teor de açúcar da planta, bem como sua resistência a doenças e condições adversas de solo e clima. O Projeto Genoma é o resultado de uma parceria da Copersucar com a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), que mobilizou cerca de 200 pesquisadores e 27 instituições, entre 1999 e 2002.

Em 1991, foi formado o Consórcio Internacional de Biotecnologia de Cana-de-Açúcar (ICSB), constituído por 17 instituições e 12 países, com a CTC como membro

brasileiro. As despesas e os resultados são compartilhados entre os participantes. O Brasil, a Austrália e a África do Sul são os participantes mais atuantes.

Pode-se dizer que o Brasil está na vanguarda tecnológica na biologia molecular, embora as leis e regulamentos travem e dificultem a utilização comercial dos resultados já alcançados. Já existem diversas variedades transgênicas disponíveis nos centros de pesquisas, tais como as que são resistentes a vários tipos de herbicidas, à broca-da-cana e ao “amarelinho”. Espera-se que nos próximos cinco anos seja iniciado o uso comercial de variedades transgênicas.

6.2.3 HIDRÓLISE DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS

Diversas tecnologias de produção de etanol com base na utilização do bagaço estão sendo desenvolvidas em todo o mundo e poderão atingir estágio comercial nos próximos anos. Vários processos estão sendo testados para converter de forma eficiente a celulose e a hemi-celulose de resíduos em hexoses e pentoses fermentáveis.

6.2.4 CO-GERAÇÃO E OUTROS USOS PARA O BAGAÇO E A PALHA

As tecnologias para cogeração utilizadas no Brasil, baseadas nos sistemas de ciclos a vapor d'água, com queima de bagaço, são amplamente dominadas e apresentam custos competitivos. Novos avanços tecnológicos com o objetivo de aumentar os excedentes de energia elétrica e a produção de álcool por tonelada via hidrólise dependem da necessidade de disponibilizar, na usina, a maior quantidade de fibra possível. Entre as tecnologias em andamento para aumentar a disponibilidade de fibras na usina estão a colheita de cana sem queima com o recolhimento da palha e a gaseificação do bagaço, convertendo o combustível sólido em gasoso.

6.3 APLICAÇÕES DA COGERAÇÃO EM SUCROALCOOLEIRAS

BRASILEIRAS

Serão apresentadas quatro usinas do estado de São Paulo, onde três delas vendem seus excedentes e uma delas gera energia elétrica para consumo próprio. Considerando a produção de cana-de-açúcar, pode-se dizer que as quatro usinas

apresentam o mesmo porte. Para estes estudos, serão utilizados os dados levantados por (Dantas Filho, 2009).

É apresentado na Tabela 4 breves descrições de cada usina que será comentada no decorrer desta seção.

Tabela 4 Breves Descrições das Usinas

Características do processo	Santa Isabel	Cerradinho	Catanduva	Santa Cândida
Processamento de cana-de-açúcar	2,5 milhões	2,4 milhões	4 milhões	3 milhões
Safra	Safra 2008	Safra 2008	Safra 2008	Safra 2008
Safra	Maio/Novembro	Abril/Novembro	Março/Novembro	Março/Novembro
Geração de eletricidade	40 MW	75 MW	12 MW	29 MW
Auto-consumo	18 MW	25 MW	10 MW	8 MW
Exportação	22 MW	50 MW	2 MW	21 MW
Agente comprador	Eletrobras (PROINFA)	Eletropaulo Eletrobras Duratex	Não vende	CPFL

6.3.1 USINA CERRADINHO

Usina que implantou uma destilaria de álcool hidratado carburante e em pouco tempo dobrou sua capacidade de moagem de cana. Com a iniciativa do programa Proálcool e o surgimento de novos produtos, a produção alavancou.

Buscando a auto-suficiência e o emprego da responsabilidade socioambiental, a Usina Cerradinho implementou a técnica de cogeração a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. A primeira unidade de cogeração foi instalada em 2002, com capacidade instalada de 25 MW. A Usina Cerradinho (unidade Catanduva) é a maior produtora de energia elétrica da região a partir de fonte renovável. A partir de 2004 a usina inaugurou a refinaria de açúcar.

Atualmente a Usina Cerradinho tem, além da unidade de Catanduva, mais outras duas unidades, uma em Potirendaba em São Paulo e outra em Chapadão do Céu, no estado de Goiás.

A usina gera aproximadamente 378.000 MWh, sendo 122.000 MWh para auto-consumo e 255.000 MWh para exportação. Os agentes compradores são: Eletropaulo e Eletrobrás (PROINFA) para a unidade Catanduva e a Empresa Duratex para a unidade Potirendaba. São utilizados como combustível na caldeira o bagaço e uma proporção de 3% a 5% de cavaco de madeira.

É demonstrada, na Tabela 5, a estrutura da Usina Cerradinho para o processo de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana.

Tabela 5 Estrutura da Usina Cerradinho

Quantidade	Descrição
2	Caldeiras de 65 bar com 480°C
1	Caldeira de 45 bar com 400°C
2	Geradores de 17.500, 25.000 KVA
2	Transformadores de 30 MVA
2	Sistemas de transporte de bagaço
2	Tratamento da água

O sistema de cogeração foi implantado custando o investimento de R\$ 56.000.000,00 (cinquenta e seis milhões de reais) para instalação da unidade de Catanduva e R\$ 47.000.000,00 (quarenta e sete milhões de reais) para implementação da unidade de Potirendaba. O total do investimento foi de 103.000.000,00 (cento e três milhões de reais) para a geração de 75 MW de potência instalada.

6.3.2 USINA SANTA ISABEL

Entrou para o setor sucroalcooleiro em 1977, com a implantação da Destilaria Santa Isabel Ltda, em Novo Horizonte, voltada inicialmente à produção de aguardente de cana-de-açúcar. Iniciou a produção de álcool hidratado carburante em 1983 com a instalação de uma nova planta. A produção de açúcar foi iniciada em 1998. O álcool anidro foi produzido a partir de 2000. Em 2006 a Usina Santa Isabel inaugura sua segunda unidade em Mendonça, SP.

A unidade de Novo Horizonte inicia a utilização da técnica da cogeração em 2007, com potência de 40 MW e com o objetivo de venda de excedente de 25 MW ao sistema interligado Sul/Sudeste para o ano de 2009.

A unidade de Mendonça possui capacidade de geração de energia de 39 MW, sendo que 17 MW como consumo próprio e 22 MW vendidos a Eletrobrás (PROINFA).

A estrutura da Usina Santa Isabel pode ser entendida pela análise da Tabela 6.

Tabela 6 Estrutura da Usina Santa Isabel

Quantidade	Descrição
2	Caldeiras de 65 bar com 480°C
1	Caldeira de 45 bar com 400°C
2	Geradores de 17.500, 25.000 KVA
2	Transformadores de 30 MVA
2	Sistemas de transporte de bagaço
2	Tratamento da água

O sistema de cogeração da Usina Santa Isabel custou o investimento de aproximadamente R\$ 3.000.000,00 (três milhões de reais) por MW gerado, sendo R\$ 1.500.000,00 (um milhão e quinhentos mil reais) por MW gerado para cada unidade.

6.3.3 USINA SANTA CÂNDIDA

Atua no setor há mais de quatro décadas. Inseriu-se em 1980 no mercado do álcool combustível, passando a produzir álcool anidro e hidratado para abastecimento da frota nacional de veículos movidos a esse combustível. Deu início à fabricação de açúcar em 1996.

Em 1997 houve uma grande quantidade de investimento para melhorar a qualidade de seus produtos e a capacidade produtiva. No mesmo ano, o sistema de cogeração foi implantado. A capacidade instalada da Usina Santa Cândida para geração a partir do bagaço é de 29 MW, sendo 8 MW utilizados internamente e 21 MW comercializados como excedentes, sendo 15 MW vendidos à CPFL e 6 MW utilizados como reserva para garantia contratual.

Para o processo de cogeração desta usina, tem-se os dados dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 Estrutura da Usina Santa Cândida

Quantidade	Descrição
2	Caldeiras de 21 bar com 300°C
1	Caldeira de 42 bar com 400°C
3	Geradores de 18.750, 15.000 e 20.000 KVA
1	Transformadores de 25 MVA
1	Sistemas de transporte de bagaço
1	Tratamento da água

Para a implantação da técnica de cogeração, a Usina Santa Cândida investiu aproximadamente R\$ 1.190.000,00 (um milhão, cento e noventa mil reais) por MW. Com a capacidade instalada de 21 MW, monta-se o investimento de R\$ 25.000.000,00 (vinte e cinco milhões de reais).

6.3.4 USINA CATANDUVA

A Usina Catanduva deu início às atividades em 1933, com a instalação de sua primeira unidade Itapira (SP), denominada Nossa Senhora Aparecida. Em 1971 foi adquirida a Usina Catanduva, no município de Ariranha. Com a expansão do setor, mais duas novas unidades foram instaladas na região noroeste do estado: a unidade de José Bonifácio (2006) e a unidade de Monções (2008).

A capacidade instalada da usina para geração de energia a partir da biomassa do bagaço da cana é de 12 MW. O consumo próprio médio é em torno de 10 MW, o que resulta em um excedente de 2 MW.

A estrutura desta usina é encontrada na Tabela 8.

Tabela 8 Estrutura da Usina Catanduva

Quantidade	Descrição
5	Caldeiras de 21 bar
3	Geradores de 3.250, 5.000 e 6.250 KVA
1	Transformador
1	Tratamento da água

Para a aplicação do projeto de cogeração, a Usina Catanduva desembolsou aproximadamente R\$ 1.000.000,00 (um milhão de reais) por MW gerado. Dada a capacidade instalada de 12 MW, conclui-se que o montante investido foi de 12.000.000,00 (doze milhões de reais).

Com a análise destes quatro exemplos encontrados no Estado de São Paulo, conclui-se que a aplicação dos sistemas de cogeração é completamente viável e de interesse das empresas tanto para a colaboração com a sustentabilidade do planeta, quanto ao retorno de investimento econômico. A economia com a autossuficiência de eletricidade é tamanha que cobre os dispêndios iniciais com a instalação de uma nova configuração da planta industrial. Além do mais, é possível e completamente atrativa a venda de excedentes de energia elétrica.

A cogeração de energia elétrica torna-se, portanto, uma tecnologia que respeita os limites da natureza, que propõe alternativa para o Sistema Interligado Nacional e gera lucros para as empresas que a aplicam.

7 CONCLUSÕES

Neste documento transmitiram-se as considerações necessárias para o entendimento do processo de cogeração a partir do aproveitamento da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar, assim como a situação e o potencial do Brasil neste setor.

Ficou evidenciado que a cogeração é uma alternativa eficiente para o uso racional da energia disponibilizada pela natureza, possibilitando o aproveitamento energético do bagaço da cana, que antes era tido como rejeito do processo produtivo sucroalcooleiro.

A principal contribuição desse trabalho foi o desenvolvimento de uma revisão literária no contexto do setor elétrico brasileiro sobre a cogeração e a utilização do bagaço da cana como uma fonte renovável alternativa de elevado potencial, dada a cultura sucroalcooleira do Brasil. Para tais levantamentos, foram evidenciados o estado da arte, a elaboração de perspectivas e estudos de caso.

Conclui-se que o bagaço da cana-de-açúcar é uma fonte de energia de grande relevância e capacidade econômica e energética. O melhor aproveitamento desta fonte implica em um ganho significativo para as empresas que aplicam a cogeração e para o setor elétrico brasileiro, uma vez que o aproveitamento deste insumo pode ser realizado em períodos de estiagem das grandes bacias hidrográficas brasileiras que se encontram integralizadas ao Sistema Elétrico por meio das hidrelétricas.

Fica comprovado que a utilização de sistemas de cogeração é uma alternativa que apresenta inúmeras vantagens que viabilizam a introdução das usinas sucroalcooleiras no contexto elétrico brasileiro. A posição do Brasil como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar corrobora a necessidade de melhor aproveitar esta matéria-prima. A racionalização do uso da energia do bagaço da cana envolvendo tanto a geração de eletricidade como a produção de calor reflete numa solução singular ao problema do esgotamento de recursos.

Constata-se que há a necessidade, todavia, de aprimoramentos significativos para a melhoria do processo de geração em usinas sucroalcooleiras. Tem-se muito conhecimento sobre a utilização energética do bagaço da cana, entretanto, é notável a necessidade de estudar novas rotas tecnológicas para o aproveitamento também da palha, que é rejeitada na colheita da cana-de-açúcar.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª. ed. Brasília - DF: Aneel, 2008.

ALCARDE, A. R. Cana-de-açúcar: geração de energia elétrica. **EMBRAPA**, 2013. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_107_22122006154841.html>. Acesso em: 11 Abril 2013.

ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA - COGEN. Conceito e Tecnologias. **COGEN - Associação da Indústria de Cogeração de Energia**. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/cog_conceito.asp>. Acesso em: 05 Novembro 2014.

AVELLAR, L. H. N. Biogás na co-geração. **Revista Biotecnologia ciência e desenvolvimento**, Brasília, v. 13, p. 46-49, Março/Abril 2000.

AZZI, G. M. **Incidência de matéria estranha nos processos de carregamento da cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura "LUIZ DE QUEIROZ". Piracicaba, p. 112. 1967.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Brasília, p. 157. 2006.

BASQUEROTO, C. H. C. C. **Cogeração de energia elétrica com bagaço de cana-de-açúcar compactado**. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba. Araçatuba, p. 56. 2010.

BRANDÃO, S. D. S. **Cogeração**. Universidade de Coimbra. Coimbra. 2004.

CAMARGO, C. A.; USHIMA, A. H.; RIBEIRO, M. M. **Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool – Manual de Recomendações**. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo. 1990.

CARDOSO, T. F. **Cogeração de energia através do bagaço de cana-de-açúcar: revisão de literatura**. Universidade de São Carlos. Sertãozinho, p. 22. 2011.

CARVALHO, F. D. R.; NOGUEIRA, L. A. H.; TEIXEIRA, F. N. Cogeração e Geração Distribuída. In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, v. II, 2004. p. 1296.

CENBIO. **Atlas de Bioenergia do Brasil**. Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO. São Paulo. 2012.

CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. **Recomendação de Adubação para a Cultura da Cana-de-açúcar**. Cooperativa dos Produtores de Cana, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo. Piracicaba. 1988.

COGEN EUROPE. **Educogen - An educational tool for cogeneration**. COGEN Europe. Bruxelas. 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira : cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2013**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília. 2013.

CORRÊA NETO, V. **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar e Gás Natural**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, p. 194. 2001.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, S.; OLIVARES GÓMEZ, E. **Biomassa para energia**. 1ª. ed. Campinas: Editora da Unicamp, v. I, 2008.

DANTAS FILHO, P. L. **Análise de Custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana-de-açúcar: um Estudo de Caso em Quatro Usinas de São Paulo**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 175. 2009.

DANTAS, D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 131. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**. Ministério de Minas e Energia. [S.l.]. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2014**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2014.

FERRÃO, P. D. M.; WEBER, F. A. **Cogeração: Uma Abordagem Socioeconômica**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Fontes de Energia e Eficiência Energética: Oficina de trabalho da Plataforma Empresas pelo Clima**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2011.

GUARDABASSI, P. M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 127. 2006.

GVCES & IEDI. **Tendências e Oportunidades na Economia Verde: Eficiência Energética**. 1ª. ed. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2010.

IEA; OECD; EUROSTAT. **Energy Statistics Manual**. International Energy Agency - IEA; Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD; Statistical Office of the European Communities - Eurostat. Paris, p. 196. 2005.

MARÇAL, A. G. G. **Cogeração: uma abordagem introdutória**. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, p. 33. 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Biomassa. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso em: 24 novembro 2014.

NAGAOKA, M. D. P. T. **A comercialização da energia elétrica cogorada pelo setor sucroalcooleiro em regiões do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Botucatu, p. 137. 2002.

OLIVEIRA, M. P. D. **Dimensionamento operacional e econômico de um sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar: estudo de caso.** Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, p. 83. 2012.

OLIVEIRA, M. P. D. **Cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar.** Centro Estadual de Educação Tecnológica "PAULA SOUZA". Taraquaritinga, p. 48. 2013.

PINTO, P. D. S. Z.; MARTONE; CARDOSO, L. M. **Análise da Viabilidade Econômica e Financeira para a Implantação de Sistemas de Cogeração.** Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá. 2001.

RIOS, M. Cogeração amplia faturamento em 15% e reduz passivo ambiental. **Revista Energia Mundo**, v. 17, n. Ano 3, Fevereiro 2011.

UNICA. **Bioeletricidade: a energia verde e inteligente do Brasil.** UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. São Paulo. 2011.

WALTER, A. C. S.; NOGUEIRA, L. A. H. **Produção de Eletricidade a partir da Biomassa.** Universidade do Amazonas. Manaus. 1997.