

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

WILLIAM FERNANDO CERATTO  
RAPHAEL HENRIQUE SOARES FARIA

**ESTUDO DA COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO  
DE MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

WILLIAM FERNANDO CERATTO  
RAPHAEL HENRIQUE SOARES FARIA

**ESTUDO DA COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO  
DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina TCC 2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica Eletrotécnica Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Maria de Fátima Ribeiro Raia, Dr. Eng.

CURITIBA

2013

William Fernando Ceratto  
Raphael Henrique Soares Faria

## Estudo da cogeração em uma indústria de beneficiamento de madeira

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica (matriz 518) do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 10 de setembro de 2013.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Prof. Ma. Annemarlen Gehrke Castagna, professora responsável  
pelos trabalhos de conclusão de curso  
de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Maria de Fátima Ribeiro Raia, Dra.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientadora

### BANCA EXAMINADORA

---

Joaquim Eloir Rocha, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jair Urbanetz Junior, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Maria de Fátima Ribeiro Raia, Dra.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica

## RESUMO

CERATTO, William F. FARIA, Raphael H. S. **Estudo da cogeração em uma indústria de beneficiamento de madeira.** 2013. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica). Universidade Tecnológica do Paraná. Curitiba. 2013.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem teórica e prática sobre a cogeração de uma indústria brasileira de beneficiamento de madeira. Estuda os conceitos da cogeração do ponto de vista técnico e como os sistemas podem ser utilizados, bem como uma visão do seu emprego no Brasil e os tipos de combustíveis utilizados. Estuda a geração de vapor, evidenciando os processos mais eficientes para serem empregados bem como o funcionamento das caldeiras onde ocorrem as trocas térmicas. Discute como a cogeração é empregada nos diferentes setores industriais, qual a sua viabilidade, e quais são as fontes alternativas mais empregadas por cada setor. Realiza uma comparação dos tipos de turbinas empregadas na cogeração bem como a reutilização de gases e vapores quentes para a queima do combustível. É complementado com a pesquisa de campo na indústria em questão, descrevendo as informações obtidas e todo o seu processo avaliando a sua demanda por vapor e a utilização da energia elétrica gerada no gerador síncrono, a viabilidade através da venda desta energia e da economia com o vapor extraído. Traz como resultado do estudo a conclusão sobre a eficiência da cogeração da indústria em questão, que é muito alta devido às tecnologias que são utilizadas em seu processo e a sua necessidade de vapor para o processo produtivo.

**Palavras-chave:** Cogeração, Combustíveis, Geração de Vapor, Caldeiras, Fontes Alternativas, Turbinas.

## ABSTRACT

CERATTO, William F. FARIA, Raphael H. S. **Study of cogeneration in a wood processing industry**. 2013. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica). Universidade Tecnológica do Paraná. Curitiba. 2013.

This research provides a theoretical and practical approach on the cogeneration in a Brazilian wood processing industry. Studies the concepts of cogeneration in terms of technical and how systems can be used, as well as a vision of their employment in Brazil and fuel types. Studying the generation of steam, showing the most efficient processes to be employed as well as the operation of boilers where heat exchange occurs. Discusses how cogeneration is used in different industrial sectors, which its viability, and what are the alternative sources most used by each sector. Makes a comparison of the types employed in the turbine cogeneration well as reuse of hot gases and vapors to burn the fuel. It is complemented with field research in the industry in question, describing the information obtained and the whole process assessing their demand for steam and the use of the electricity generated in the synchronous generator, the feasibility through the sale of this energy and the economy with steam extracted. Brings as a result of the study the conclusion on the efficiency of the cogeneration industry in question, which is very high due to the technologies that are used in the process.

**Keywords:** Cogeneration. Fuels. Steam Generation. Boilers. Alternative Sources. Turbines.

## LISTA DE SIGLAS E UNIDADES

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Autoprodutor de Energia
BEN	Balanco Energético Nacional
BIG/STIG	<i>Biomass Integrated Gasifier / Steam injected Gás</i>
BIG/ISTIG	<i>Biomass Integrated Gasifier / Intercooled Steam Injected Gás Turbine</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono, gás carbônico
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ECO-92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente realizada na cidade do Rio de Janeiro em junho de 1992
LCO	<i>Light Cycle Oil</i>
kPA	Quilopascal (10 <sup>3</sup> PA)
PIE	Produtor Independente de Energia
NRCAN	<i>Natural Resources Canada</i>
PCH's	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PLD	Preço de Liquidação de Diferenças
ppm	Partes Por Milhão
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SCDE	Sistema de Coleta de Dados de Energia Elétrica
TR	Tonelada de Refrigeração
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fontes de energia utilizadas no Brasil para a geração de energia elétrica... 16	16
Figura 2. Potência instalada de cogeração em operação no Brasil. .... 19	19
Figura 3. Unidades em operação de cogeração no Brasil. .... 20	20
Figura 4. Faixas típicas de temperatura para utilização do sistema <i>topping</i> . .... 23	23
Figura 5. Sistema <i>Topping Cycle</i> . .... 23	23
Figura 6. Sistema <i>topping</i> ciclo-combinado. .... 24	24
Figura 7. Sistema <i>topping cycle</i> vapor-turbina. .... 24	24
Figura 8. Sistema com aproveitamento da exaustão do motor a diesel/gás. .... 25	25
Figura 9. Sistema <i>topping</i> com turbina a gás. .... 25	25
Figura 10. Sistema <i>Bottoming Cycle</i> . .... 26	26
Figura 11. Faixas típicas de temperatura para utilização do sistema <i>bottoming</i> . .... 26	26
Figura 12. Sistema com turbina de contrapressão. .... 27	27
Figura 13. Sistema com turbina a vapor a condensação. .... 29	29
Figura 14. Sistema com turbina de condensação e extração. .... 30	30
Figura 15. Sistema com turbina a gás simples. .... 32	32
Figura 16. Sistema com turbina a gás com injeção de vapor. .... 33	33
Figura 17. Sistema com turbina a gás com injeção de vapor com reaproveitamento do vapor do processo. .... 34	34
Figura 18. Sistema com turbina a gás com injeção de vapor e aplicação de gases quentes à câmara de combustão. .... 35	35
Figura 19. Sistema BIG STIG. .... 37	37
Figura 20. Sistema BIG/ISTIG. .... 38	38
Figura 21. Percentuais de utilização de fontes renováveis no Brasil e no mundo. .... 39	39
Figura 22. Percentuais de utilização de fontes de energia no Brasil em 2011. .... 40	40
Figura 23. Percentuais da utilização de diferentes tipos de fonte de energia. .... 41	41
Figura 24. Unidades de cogeração que utilizam biomassa a partir da cana de açúcar. .... 42	42
Figura 25. Unidades de cogeração que utilizam gás natural. .... 43	43

Figura 26. Unidades de cogeração que utilizam óleo diesel.....	44
Figura 27 - Unidades de cogeração que utilizam outros tipos de combustíveis.....	44
Figura 28 - Diagrama em blocos da planta de cogeração.....	51
Figura 29 – Interior de uma caldeira com grelha. ....	52
Figura 30 – Ilustração do interior das paredes de uma caldeira aquatubular.....	53
Figura 31 - Entrada de vapor na turbina.....	54
Figura 32 - Redutor de velocidade. ....	55
Figura 33 - Gerador síncrono.....	55
Figura 34 - Esquema geral do módulo de regras. ....	59
Figura 35 - Esquema unifilar simplificado da rede de média e alta tensão. ....	61
Figura 36 – Projeção da energia gerada em junho de 2013.....	62



## SUMÁRIO

<b>1. TEMA .....</b>	<b>9</b>
1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	10
1.2. PROBLEMA.....	10
1.3. OBJETIVOS.....	10
1.3.1. Objetivo geral .....	10
1.3.2. Objetivos Específicos .....	10
1.4. JUSTIFICATIVA.....	11
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	11
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO E RECURSOS .....	12
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
2.1. HISTÓRICO E O CONTEXTO ENERGÉTICO DA COGERAÇÃO .....	14
2.2. A IMPORTÂNCIA DA COGERAÇÃO.....	16
2.3. CONDIÇÕES DE VENDA DE ENERGIA ELÉTRICA POR COGERADORES.....	18
2.4. GERAÇÃO DE VAPOR.....	20
2.5. TECNOLOGIAS PARA OS SISTEMAS DE COGERAÇÃO.....	22
2.5.1 Turbina a vapor em contrapressão .....	26
2.5.2 Turbina a vapor a condensação.....	29
2.5.3 Turbina de condensação e extração.....	30
2.5.4 Turbina a gás simples.....	31
2.5.5 Turbina a gás com injeção de vapor .....	33
2.6 FONTES DE ENERGIA UTILIZADAS NO BRASIL .....	39
2.7 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA COGERAÇÃO .....	41
2.7.1 Biomassa.....	45
2.8 A COGERAÇÃO DO PONTO DE VISTA TÉCNICO.....	45
2.9 CASOS DE SUCESSO DA COGERAÇÃO .....	47
<b>3 ESTUDOS REALIZADOS NA EMPRESA DE BENEFICIAMENTO DE MADEIRAS .....</b>	<b>49</b>
3.1. A EMPRESA .....	49
3.2. PLANTA DE COGERAÇÃO.....	50
3.2.1. Tratamento da água de alimentação da caldeira .....	51
3.2.2. Caldeira .....	52
3.2.3. Geração de vapor.....	53
3.2.4. Geração da energia elétrica.....	54

3.2.5. Extração de vapor da turbina para o processo produtivo .....	56
3.3. UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA E ESTUDO DO COMBUSTÍVEL.....	56
3.4. CLIMATIZAÇÃO COM CHILLERS DE ABSORÇÃO .....	57
<b>4. ASPECTO ECONÔMICO DA COGERAÇÃO .....</b>	<b>58</b>
4.1. COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA.....	58
4.1.1 Consumidores Livres .....	58
4.1.2 Procedimentos de medição da energia elétrica .....	59
4.2 COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA GERADA PELA COGERAÇÃO DA EMPRESA DE BENEFICIAMENTO DE MADEIRAS.....	60
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1. TEMA

A cogeração é definida como *“uma instalação na qual se produz de forma combinada energia elétrica e outras formas usuais de energia térmica que podem ser utilizadas em indústrias, comércios, aquecimento ou resfriamento, por meio do uso sequencial de energia a partir de um combustível”* (CLEMENTINO, 2001, p.26).

No Brasil, este tema vem crescendo nos últimos anos, em virtude da grande procura por melhorias na eficiência energética aplicada aos setores industriais e até mesmos aos setores comerciais como, por exemplo, shopping centers e hotéis. Com a atual tendência do uso mais intensivo do gás natural e mesmo para combustíveis tradicionalmente já utilizados, a análise da viabilidade técnico-econômica de novos empreendimentos de plantas de cogeração de energia elétrica passa a ser da maior relevância.

De acordo com Clementino, 2001, é fato que, do ponto de vista energético, o mundo, ainda, continua a basear o seu modelo denominado de desenvolvimento na utilização de combustíveis fósseis, em grande quantidade o carvão mineral e, mais especificamente, aqueles associados à tecnologia do petróleo. Tendo em vista os problemas ambientais, o carregamento do sistema de potência nos horários de maior solicitação, o aumento do preço da energia e a confiabilidade de um sistema elétrico que deveria ser ininterrupto, algumas indústrias estão adotando o sistema de cogeração. O uso de combustíveis como a biomassa e outros como o gás natural trazem melhores soluções quanto ao uso mais eficiente da energia elétrica, pois o calor liberado na queima destes combustíveis pode ser aproveitado para aquecer fluidos que fazem parte do sistema de produção das máquinas. Estes combustíveis também reduzem a emissão de poluentes atmosféricos, conservando a qualidade do ar. Dado o caráter de uso mais eficiente do combustível, a cogeração de energia elétrica contribui para o controle do efeito estufa e também colabora no sentido da implementação de um modelo sustentável de desenvolvimento. Tendo em vista o tema que aborda eficiência energética, ou seja, o melhor aproveitamento dos recursos naturais, o que evita desperdícios de energia e matéria prima, colaborando com redução de custos, alívio do sistema elétrico e com redução dos impactos ambientais, torna-se, então, importante o estudo de implantação de um sistema de cogeração em uma planta industrial, desde que seja compatível com os modelos atualmente existentes. O estudo dos sistemas de caldeiras, tipo de combustíveis, geradores e modelos de utilização de energia calorífica também são importantes.

## **1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA**

O estudo do sistema de cogeração será realizado em uma indústria de beneficiamento de madeiras, ou seja, como as energias elétrica e térmica geradas poderão ser utilizadas de forma mais eficiente. O combustível da cogeração, que será estudado, é as sobras de madeira geradas nos processos produtivos da indústria.

## **1.2. PROBLEMA**

O problema a ser resolvido é se o sistema de cogeração, que estará sendo estudado, compensa os investimentos da indústria, e se ele está sendo eficiente, ou seja, quais são as tecnologias que melhor se adaptam ao sistema da empresa, caso estejam obsoletas. Caso a indústria em questão, já esteja usando as melhores tecnologias, estudaremos a planta como mais um caso de sucesso de cogeração. A indústria em questão não tem documentado um estudo de avaliação do sistema de cogeração do ponto de vista técnico e econômico.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo geral**

Estudar o sistema de cogeração da indústria em questão, atuante na área de beneficiamento de madeiras em MDP e MDF. Determinando do ponto de vista técnico e econômico, qual é a melhor forma de aproveitamento do vapor e da geração de energia elétrica. Compensando os investimentos na planta de cogeração, evidenciando a importância da energia gerada e sua viabilidade técnica e econômica.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- contextualizar a cogeração no Brasil e no mundo;
- estudar sobre a comercialização da energia excedente para a concessionária;
- estudar a composição básica de um sistema de cogeração;
- estudar as tecnologias e combustíveis empregados em plantas de cogeração;
- buscar casos de sistemas de cogeração que obtiveram êxito;
- estudar o sistema de cogeração da indústria em questão, apresentando alternativas tecnológicas, ou seja os tipos de cogeração que melhor se adaptam a

necessidade de vapor da indústria, se caso as tecnologias empregadas estejam obsoletas. Analisando a cogeração do ponto de vista técnico;

- estudar o combustível utilizado com relação ao custo (R\$/toneladas) e seu rendimento em combustão (tonelada/MWh);
- realizar estudo sobre aspecto econômico da planta de cogeração;
- realizar considerações finais sobre o sistema atual de cogeração.

#### **1.4. JUSTIFICATIVA**

A planta instalada foi criada com o objetivo de criar economias com o uso do sistema de cogeração, ou seja, gerar o próprio vapor, já que este custa muito caro, e o sistema produtivo exige muito o seu uso. Além disso, pode-se aproveitar o vapor para gerar energia elétrica e vender o excedente para a concessionária. Por este motivo torna-se importante o estudo sobre as tecnologias empregadas na planta e a economia gerada com o sistema, com o intuito de evidenciar pontos fracos e sugerir soluções. Certos equipamentos em planta de cogeração da indústria em questão, encontram-se ultrapassados tecnologicamente, necessitando assim, de uma análise técnica geral da planta, a qual será realizada conforme mostrado nos objetivos específicos.

O estudo em questão possibilitará a empresa criar um plano diretor, o qual definiria diretrizes de atualização de equipamentos da planta e manobras econômicas para a venda de energia excedente, visando um melhor rendimento da planta, do ponto de vista técnico e econômico.

Como a indústria estudada necessita de uma grande quantidade de vapor em seus processos, o rendimento global da planta já está em um nível elevado, comparado com indústrias que não utilizam grandes volumes de vapor em seus processos. Com isso, a sugestão de melhora em certos pontos, pode ter como consequência um número de rendimento global pouco acima do atual, mas não menos importante para a empresa.

#### **1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Os estudos sobre o estado da arte atual, os cenários nacional e mundial de indústrias que utilizam a cogeração, o sistema básico de cogeração serão realizados com pesquisas a livros de referência, revistas técnicas, anais de congresso, professores, profissionais da área de cogeração, internet e entre outros.

Com visitas em campo será realizado o levantamento do sistema de cogeração da empresa (Equipamentos e procedimentos utilizados) para obtermos os dados necessários para comparação e estudo.

Baseado nos dados fornecidos será realizado uma análise sobre a comercialização da energia gerada, energia consumida, alternativas tecnológicas e entre outros.

A empresa fornecerá os dados do combustível, lembrando que um dos integrantes deste estudo de cogeração, tem autorização para obtenção dos dados. A partir desta etapa, será iniciado um estudo do combustível utilizado, mostrando gráficos de rendimento e entre outros.

Realizar análise econômica contendo estudos sobre viabilidade, custos de manutenção e equipamentos, energia vendida, compra de combustível e análise do retorno de investimento;

Para conclusão deste objetivo específico, o dividiremos em duas etapas:

- análise das faturas de energia elétrica da indústria em questão, com o objetivo de se obter dados de energia vendida para concessionária, energia consumida da concessionária.
- realização estudo de análise econômica usando os dados das duas etapas anteriores.

As considerações finais serão embasadas em todos os levantamentos realizados em comparação com o objetivo específico sobre alternativas tecnológicas.

## **1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO E RECURSOS**

Este trabalho será composto por:

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO – será abordado de forma contextual e superficial o tema proposto.

Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – Importância da cogeração, comercialização de energia, legislação vigente, princípios de funcionamento do sistema de cogeração, alternativas tecnológicas como: turbinas usadas, ciclos dos sistemas, resíduos usados como combustível.

Capítulo 3 – ESTUDO DE COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE MADEIRAS – Levantamento de dados referentes ao sistema de cogeração a fim de se realizar os estudos e análises descritos no objetivos específicos.

Capítulo 4 – ASPECTO ECONÔMICO DA COGERAÇÃO – Obtenção dos dados referentes a área econômica da cogeração afim de se realizar os estudos e análises descritos no objetivo específico sobre aspecto econômico.

Capítulo 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS – Avaliação geral do sistema de cogeração e proposta de alternativas tecnológicas se for o caso.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. HISTÓRICO E O CONTEXTO ENERGÉTICO DA COGERAÇÃO**

No ano de 1882, registrou-se que Thomas Edison realizara a construção de uma planta de cogeração que gerava energia elétrica e térmica para aquecimento dos prédios vizinhos à planta. No final do século 19, a cogeração era largamente usada para geração de energia elétrica e térmica das indústrias. Após esse período, em um cenário mundial e no início do século 20, a cogeração começou a perder espaço para as grandes centrais hidrelétricas, se limitando a plantas isoladas da rede de distribuição. Já no século 20, até a década de 40, a cogeração continuava a perder espaço para as grandes centrais hidrelétricas, sendo restrita por leis de concessionárias, as plantas de porte e rendimento consideravelmente grandes.

A partir da década de 90, a cogeração iniciou um processo de crescimento até então nunca experimentado, pois até o momento, não se dava a importância necessária para as energias consideradas “limpas”, e iniciou-se o conceito de “ideologia verde” com pressões dos ambientalistas sobre as formas de geração de energia. Essas pressões eram convertidas em metas, estabelecidas em convenções mundiais (UNFCCC, 2013; ECO-92).

Do ponto de vista energético, o mundo ainda se baseia no desenvolvimento com a utilização de combustíveis fósseis. Este modelo tem sido analisado de forma negativa nos últimos anos devido ao impacto ambiental causado pela sua queima e a sua característica de combustível extremamente poluidor, o qual se torna um problema em se tratando de desenvolvimento sustentável. Esta relação entre energia, meio ambiente e modelos de desenvolvimento tem gerado uma revolução que visa o melhor aproveitamento da energia degradando o mínimo possível o meio ambiente, dando ênfase na utilização de fontes de energia renováveis. O gás natural, por emitir menos gás carbônico durante a sua queima e por possuir uma energia de reação grande, tem sido considerado por muitos como um caminho para um futuro para o uso de energia “limpa”.

O petróleo é um importante item na conscientização ambiental, pois as consequências de sua combustão são de suma importância, por emitir quando queimado, fuligem, gás carbônico e sulfatos que causam, respectivamente, poluição atmosférica, contribuindo para o efeito estufa, e chuva ácida.



É nesse contexto de “maior eficiência na utilização da energia” que pode ser inserida a cogeração de energia, que a partir de um mesmo elemento energético permite a geração de energia elétrica, vapor ou mecânica e calor para a produção de frio para climatização. Essa preocupação com a utilização eficiente da energia elétrica vem do fato de que o planeta está passando por um fenômeno chamado de aquecimento global, onde a cogeração tem um papel importante no não aumento ou redução do efeito estufa.

A cogeração torna possível um rendimento global maior para um determinado tipo de energia, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável o que juntamente ao uso eficiente de formas ou fontes renováveis de energia, mostra que é possível prosseguir com o desenvolvimento sem exercer maiores danos ao meio ambiente. Todos esses propósitos de uso de energia derivam do fato que atualmente não se pode prescindir da energia, um bem fundamental para sua integração ao desenvolvimento, sendo que para uma região se desenvolver plenamente, ela precisa contar com fontes de energia de custo aceitável e credibilidade garantida.

No Brasil, a utilização da cogeração não é diferente do cenário mundial, ou seja, está em estado de pleno crescimento. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2012), a oferta interna de energia elétrica de biomassa usada na cogeração totalizou 6,6%, tendo em vista que em 2007 totalizou 3,7%. No ano de 2010 e 2011, o crescimento da cogeração aumentou 0,3%, número reduzido em comparação aos anos anteriores, pois houve grande diminuição na safra de cana (9,8%), a qual o bagaço é utilizado em larga escala como biomassa. Ainda assim, os percentuais de energia renovável no Brasil (44,1%) continuaram acima da média mundial (13,3%), segundo a Agência Internacional de Energia (CLEMENTINO, 2001; BEN, 2012; IEA, 2013).

Na figura 1 mostra as fontes de energia utilizadas para a geração de energia no Brasil, e conforme pode ser visto, depois da hidráulica a mais utilizada é a biomassa.

## Matriz Elétrica Brasileira

Brasil (2011)

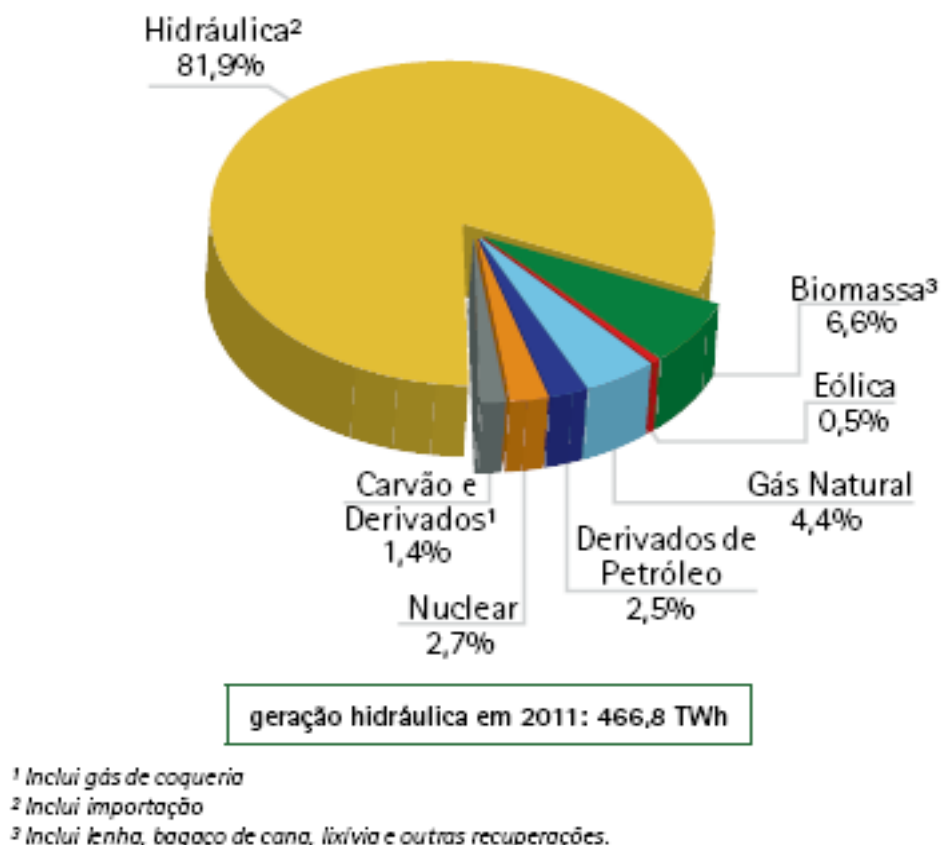


Figura 1. Fontes de energia utilizadas no Brasil para a geração de energia elétrica  
 Fonte: BEN, 2012.

### 2.2. A IMPORTÂNCIA DA COGERAÇÃO

A cogeração pode oferecer vantagens ao sistema elétrico de distribuição e geração, pois com uma quantidade de energia excedente produzida, pode-se utilizá-la para o suprimento de cargas ligadas ao sistema elétrico resultando em postergação de investimentos futuros no sistema. Como exemplo um produtor independente de capacidade reduzida de fornecimento de energia elétrica não ocasiona perturbações para o sistema elétrico, pelo contrário, proporciona benefícios localizados como melhoria dos níveis de tensão ao longo da rede e a redução de perdas. A cogeração apresenta-se tão atrativa quanto maior o número de plantas operando no sistema elétrico, situação esta que representaria para o sistema uma diminuição da carga na base (CLEMENTINO, 2001). Embora haja esses benefícios, o uso indevido e a falta de

controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico sobre as plantas, podem ocasionar uma elevação muito grande na tensão, ocasionando problemas de qualidade de energia para a concessionária.

Quanto aos geradores de grande porte com capacidade de geração superior às necessidades ou capacidades do sistema na região, devem ser verificadas as necessidades do sistema e os investimentos necessários para a transmissão do excedente gerado por estes geradores para outras regiões. Uma análise global do sistema e de sua evolução, considerando-se a capacidade de investimentos em outras fontes alternativas, pode levar, neste caso, a concluir pela conveniência de impor limites para a injeção de potência no sistema por parte dos produtores independentes. Para produtores independentes com grande capacidade de fornecimento de energia, quer seja em regime sazonal ou contínuo, além do problema de inversão do fluxo, impõe-se adicionalmente a restrição de carregamento admissível dos condutores por onde a potência injetada deverá fluir.

A importância da cogeração pode ser observada nas atividades industriais que fazem uso de grandes quantidades de energia térmica. A necessidade do calor sempre é maior, sobretudo na agroindústria, e indústrias de transformação, como a de açúcar e álcool, sucos de fruta, beneficiamento de arroz e de madeira, extração de óleo vegetal, papel e celulose, petroquímica, têxtil, tinturaria, cervejaria, cimento, vidro, cerâmica, produtos químicos e de alimentos em geral (CLEMENTINO, 2001).

As atividades exercidas nessas indústrias são usuárias de alguma forma de energia para atendimento de suas necessidades térmicas. Os combustíveis podem ser o óleo, gás, bagaço de cana, cavaco de madeira, casca de arroz, pneu velho picado ou ainda, calor para acionar compressores de amônia nos sistemas de absorção, visando produzir refrigeração. É neste contexto de aproveitamento da energia térmica onde a cogeração se torna uma boa opção de uso eficiente de energia, na qual se pode aproveitar o calor oriundo da rejeição da turbina do gerador para a produção em linha de processos e concomitantemente, produzir energia mecânica. Esta última pode servir tanto para acionar um compressor ou bomba, como um gerador de energia elétrica. Observando do ponto de vista empresarial, a cogeração torna-se um sinônimo de diminuição de custos, com diminuição de dependência energética da concessionária.

Em termos de eficiência energética, a cogeração torna-se extremamente interessante nos setores mais contextualizados dentro de cidades, como hospitais ou shopping centers situados próximos aos troncos de suprimento de gás e com

produção compatível às tecnologias de cogeração. Sendo assim, nas cidades com grandes populações onde o controle sobre a poluição é mais rigoroso, a cogeração em aeroportos, hospitais, penitenciárias, hotéis e demais estabelecimentos que fazem uso de energia em forma de calor, frio para a refrigeração ou eletricidade em volumes significativos, não somente se torna viável como proporciona redução de custos e melhora da produção (CLEMENTINO, 2001).

Nos últimos anos, o excesso de CO<sub>2</sub> na atmosfera, resultante da queima de combustíveis fósseis, trouxe um incentivo para a implantação de fontes alternativas de energia. Dessa forma, as plantas de cogeração obtiveram um crescimento significativo na última década (PDIS-BIOMASSA E COGERAÇÃO, 2013).

Maior confiabilidade do sistema de fornecimento de energia, melhor qualidade e menor custo de energia são umas das vantagens oferecidas pelo sistema de cogeração. Há casos de cogeração que o rendimento global do sistema é superior a 90%, para indústrias que utilizam grande quantidade de energia térmica em suas plantas (COGEN, 2013).

### **2.3. CONDIÇÕES DE VENDA DE ENERGIA ELÉTRICA POR COGERADORES**

Há cerca de quatro décadas em que a cogeração é usada no Brasil. A medição exata da capacidade instalada de cogeração no Brasil é difícil, pois a grande maioria está dentro de plantas fabris, na maioria das vezes fazendo parte dos processos industriais, como por exemplo: vapor utilizado em máquinas, como compressores, vapor usado diretamente nos processos de produção, e etc. A legislação pede que pelo menos haja um meio de registro das cogerações existentes em cada fábrica, mas mesmo assim, existem várias plantas de cogeração no país que não estão devidamente ou completamente cadastradas. O procedimento de cadastro é levado a sério quando há venda por parte do produtor à concessionária de energia, pois a mesma exige o cadastro completo e atualizado da planta de cogeração. Quando não há interesse por parte do produtor em venda à concessionária, dificilmente existe um cadastro preciso realizado da planta. Esse tipo de conduta dificulta muito a avaliação do sistema de cogeração no Brasil (CLEMENTINO, 2001).

As principais atividades que fazem maior uso da cogeração no Brasil são (COGEN, 2013; CLEMENTINO, 2001):

- setor Industrial:

- produção de vapor: indústria de alimentos e bebidas, química, petroquímica, papel e celulose, madeireira e têxtil.
- aquecimento direto: siderúrgicas e outras que utilizam fornos de alta temperatura.
- setor de comércios e serviços:
  - climatização central e aquecimento de água: hospitais, shopping centers, aeroportos, hotéis e etc.
- setor sucroalcooleiro: indústrias que utilizam basicamente bagaço de cana como biomassa. Representa uma grande parcela das plantas de cogeração no Brasil.

Na figura 2 estão representados os indicadores nacionais sobre cogeração que representam a potência instalada em operação no Brasil. Já na figura 3 estão representadas as unidades em operação ao longo de 30 anos.



Figura 2. Potência instalada de cogeração em operação no Brasil.

Fonte: COGEN, 2013.

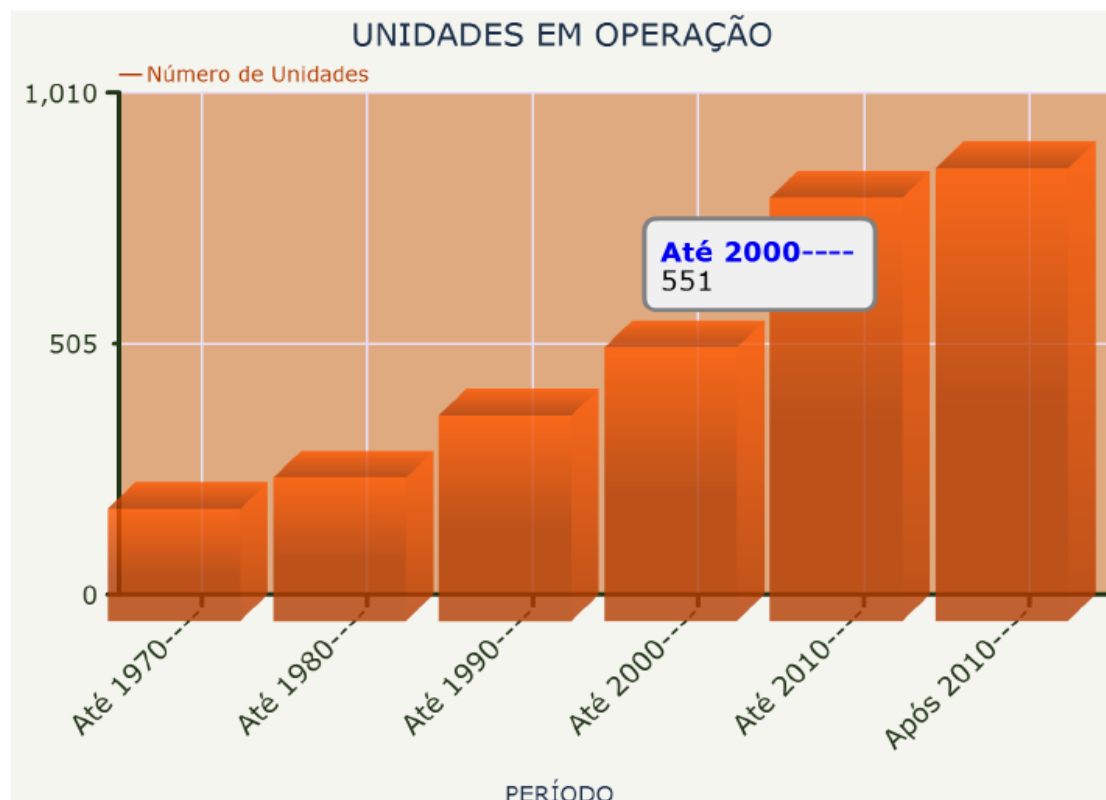


Figura 3. Unidades em operação de cogeração no Brasil.

Fonte: COGEN, 2013.

## 2.4 GERAÇÃO DE VAPOR

As unidades geradoras de vapor são construídas de acordo com normas ou códigos vigentes no país e de forma a melhor aproveitar a energia liberada pela queima de um determinado combustível. As unidades modernas e de porte maior são equipadas geralmente com os seguintes componentes:

- fornalha;
- caldeira;
- superaquecedor;
- economizador;
- aquecedor de ar.

A fornalha é o local onde ocorre a queima do combustível. São quatro níveis de queimadores que sopram uma mistura de ar e carvão pulverizado por exemplo, para o interior de uma câmara de combustão. Durante esse processo as cinzas pesadas caem por gravidade ao fundo da fornalha em um selo d'água. As cinzas leves são arrastadas pelos gases para cima, em direção aos superaquecedores que ficam no

topo da fornalha. As temperaturas no interior da câmara de combustão estão na faixa de 900 a 1400°C.

A caldeira é o local onde ocorre a mudança de fase da água do estado líquido para vapor. As paredes d'água e o tambor fazem parte da caldeira. As paredes d'água são constituídas de diversos tubos dispostos um ao lado do outro, revestindo as paredes da fornalha. A água circula livremente pela diferença de densidade e o vapor formado é acumulado na parte superior do tambor separador. O vapor fica saturado e então é encaminhado para os superaquecedores. A pressão é controlada por pressostatos ligados ao sistema de combustão (BAZZO, 1992).

O superaquecedor é constituído de feixes tubulares destinados a aumentar a temperatura do vapor que foi gerado na caldeira. Nas unidades de grande porte, os superaquecedores são projetados de modo a absorverem energia por radiação e convecção. A temperatura final do vapor pode ser controlada por uma injeção de água líquida através de um atemperador. O reaquecedor tem a função equivalente a dos superaquecedores e sua presença é necessária quando se deseja elevar a temperatura do vapor proveniente de estágios intermediários da turbina (CLEMENTINO, 2001; NOGUEIRA, 1994).

O economizador pré aquece a água de alimentação e é normalmente instalado após os superaquecedores. Ele aumenta o rendimento da unidade e minimiza o choque térmico entre a água de alimentação e a água já existente no tambor.

O aquecedor de ar é utilizado para aproveitar o calor residual dos gases da combustão no pré aquecimento do ar utilizado na queima do combustível. A temperatura final dos gases encaminhados para a chaminé é um fator determinante para que haja um aproveitamento térmico das unidades geradoras de vapor. Este valor pode variar entre 120 e 300°C.

A grande parte da energia é absorvida nas superfícies expostas diretamente na câmara de combustão, onde é predominante a troca de calor por irradiação. As paredes d'água representam menos de 10% da superfície total e são capazes de absorver até 50% da energia liberada na combustão. Nas partes posteriores da caldeira, os gases fornecem calor por convecção e por radiação gasosa. É importante que os componentes sejam instalados em contracorrente. Essa disposição garante maior eficiência e o emprego de menores superfícies de aquecimento.

Nas indústrias, as unidades geradoras de vapor são tratadas apenas como caldeiras e podem ser classificadas em:

- aquotubulares;
- flamotubulares;
- elétricas.

As caldeiras aquotubulares tem uso mais abrangente, atendendo desde pequenas fábricas até grandes centrais termelétricas. Nas caldeiras aquotubulares a água circula por dentro de tubos, e frequentemente são adaptadas em unidades equipadas com economizador e superaquecedores.

As caldeiras flamotubulares têm uso limitado às instalações de pequeno porte, com pressões inferiores a 1500 kPa ou capacidades inferiores a 15 t/h de vapor saturado. Nas caldeiras flamotubulares os gases de combustão circulam por dentro de tubos e sua aplicação é restrita apenas às operações que admitem o uso de vapor saturado.

As caldeiras elétricas são utilizadas apenas quando há disponibilidade de energia elétrica e que os custos sejam compensadores. A sua aplicação é bastante restrita e também são projetadas para fornecerem apenas vapor saturado. Essas caldeiras elétricas tem o princípio de funcionamento fundamentado na conversão direta de energia elétrica em energia térmica, através do chamado efeito Joule mediante o uso de resistências ou de eletrodos submersos (BAZZO, 1992).

## 2.5 TECNOLOGIAS PARA OS SISTEMAS DE COGERAÇÃO

As tecnologias disponíveis para cogeração se dividem em dois grandes grupos: “*Topping Cycle*” e “*Bottoming Cycle*”.

- ***Topping Cycle***: é usado inicialmente para produção de energia mecânica e elétrica, e o que é rejeitado na primeira etapa, é aproveitado pelo sistema térmico.

Segundo Carvalho, 2004, usualmente nos processos industriais, o calor útil gerado está na faixa de 120°C a 200°C. Já o vapor utilizado para a geração de eletricidade está na faixa 400°C a 900°C. Sendo assim, é mais racional usar o sistema *Topping Cycle* para reduzir as perdas de calor, pois neste sistema utiliza-se inicialmente o calor a alta temperatura diretamente para gerar energia eletromecânica. Após a geração, o calor a baixa temperatura é utilizado nos processos industriais. Dessa forma, como a maioria das indústrias usam calor a baixas temperaturas nos seus processos, esta tecnologia é a mais utilizada.



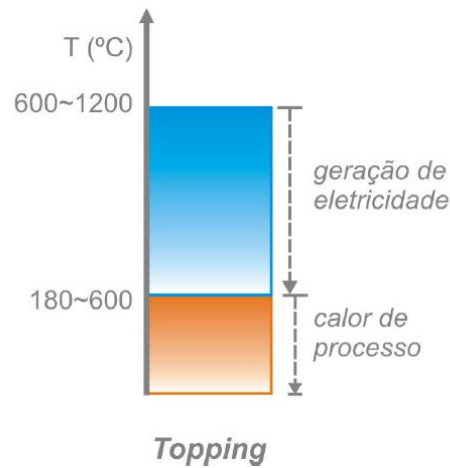


Figura 4. Faixas típicas de temperatura para utilização do sistema *topping*.  
Fonte: COGEN,2013.

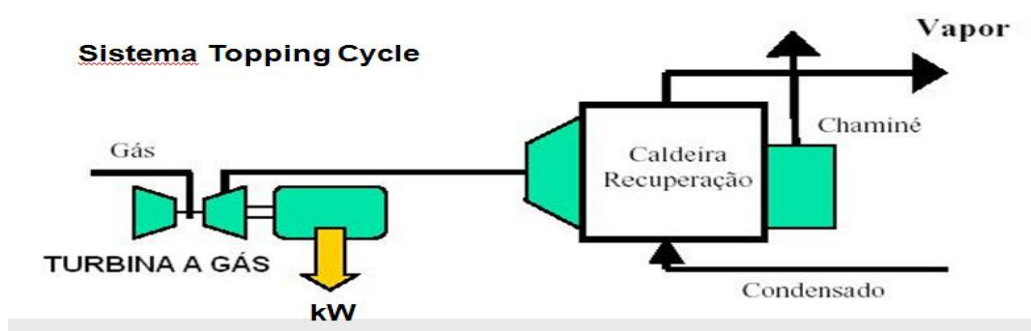


Figura 5. Sistema *Topping Cycle*.  
Fonte: GODOY, 2009.

Segundo o Departamento de Recursos, Energia e Turismo da Austrália, 2013, existem cinco tipos de *topping cycles* que são geralmente usados, os quais estão apresentados nas figuras 6, 7, 8 e 9:

No primeiro tipo, uma turbina a Gás ou um gerador a Diesel produz energia elétrica ou mecânica seguido de um Boiler recuperador de calor, criando vapor para acionar uma turbina a vapor secundária. Esse tipo de *Topping cycle* é chamado de sistema *topping* ciclo-combinado (NRCAN, 2013).

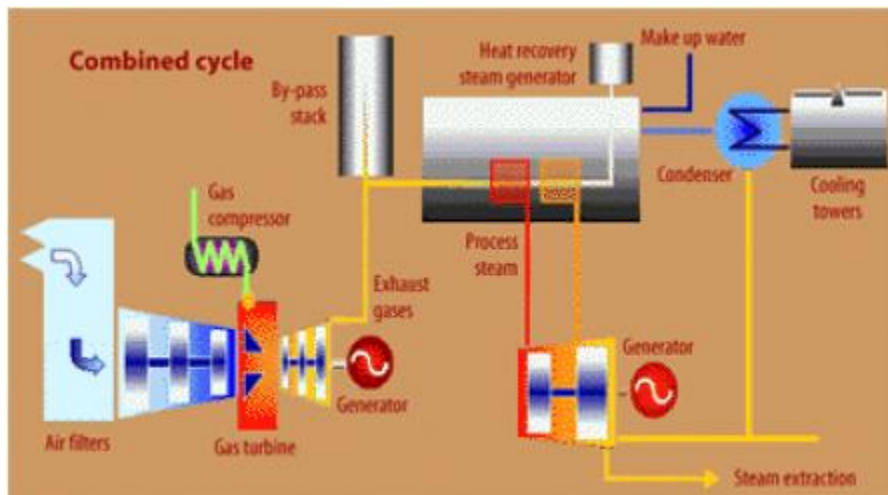


Figura 6. Sistema *topping* ciclo-combinado.

Fonte: NRCAN, 2013.

O segundo tipo, se enquadra em qualquer sistema de queima de combustível para produzir vapor de alta pressão, o qual passa por uma turbina a vapor para produzir energia. Pelo seu escape, o vapor de baixa pressão é expelido, podendo ser usado para os processos que utilizam este tipo de energia térmica. Esse tipo de *Topping cycle* é chamado de ***topping cycle vapor-turbina*** (NRCAN, 2013).

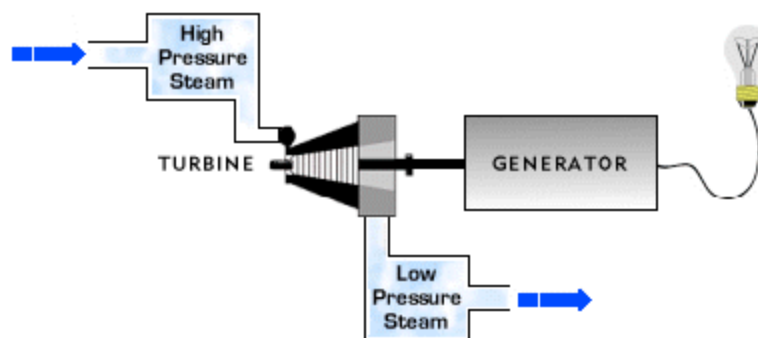


Figura 7. Sistema *topping cycle* vapor-turbina.

Fonte: NRCAN, 2013.

O terceiro tipo emprega um recuperador de calor advindo da exaustão do motor à diesel/gás. Pode-se armazenar o calor recuperado em um boiler para em seguida ser usada água quente em outros processos (NRCAN, 2013).

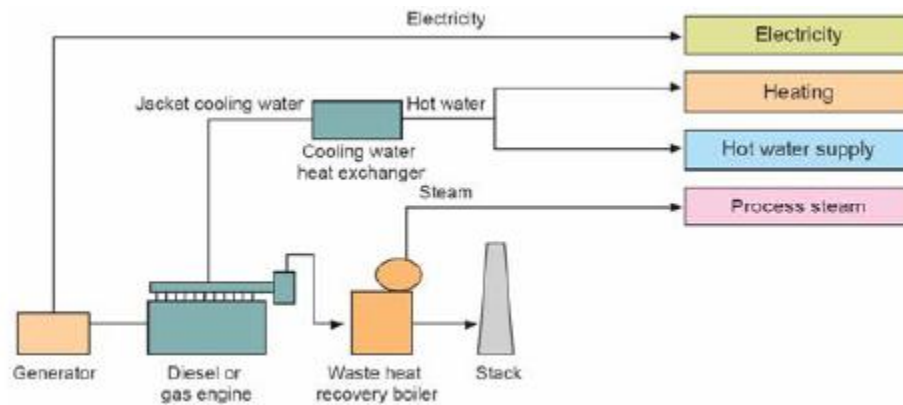


Figura 8. Sistema com aproveitamento da exaustão do motor a diesel/gás.

Fonte: NRCAN, 2013.

O quarto tipo é o **sistema topping com turbina a gás**. A turbina aciona um gerador, e o calor dos gases de exaustão é usado para outros processos. Um sistema extremamente simples, mas funcional (NRCAN, 2013).

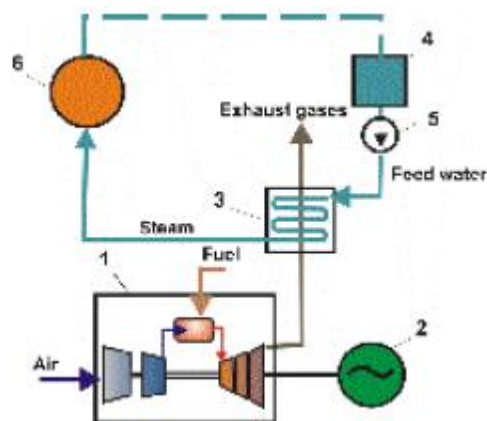


Figura 9. Sistema *topping* com turbina a gás.

Fonte: NRCAN, 2013.

- **Bottoming Cycle:** é usado inicialmente para a geração de energia térmica, e o que é rejeitado na primeira etapa, é aproveitado pelo sistema eletromecânico.

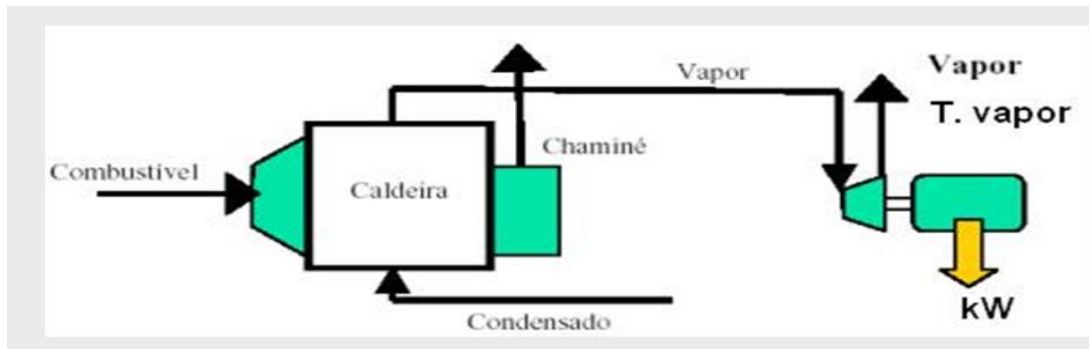


Figura 10. Sistema *Bottoming Cycle*.

Fonte: GODOY, 2009.

No sistema *bottoming cycle*, o energético produz primeiramente o vapor que é utilizado para a geração de energia mecânica e/ou elétrica, onde apenas depois é repassada ao processo.

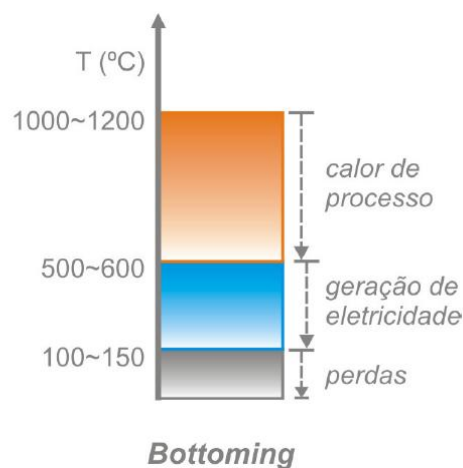


Figura 11. Faixas típicas de temperatura para utilização do sistema *bottoming*.

Fonte: COGEN, 2013.

### 2.5.1 Turbina a vapor em contrapressão

A forma geralmente utilizada para os sistemas de cogeração é o de uma turbina a vapor em contrapressão, é um dos sistemas mais simples, porém com baixo rendimento, é também chamado de Ciclo Rankine, que consiste em alimentar por uma caldeira munida com um superaquecedor, em que ela irá transferir seu escape para processos onde o calor será utilizado ao longo da linha. Por causa do seu sistema, o trabalho que é realizado é menor se comparado com outros, e o rendimento é pequeno devido ao grande desperdício de energia. Este sistema é mais utilizado em

indústrias onde ocorre a compra do combustível, que não tenha excedente ao utilizar combustível próprio ou que apesar de ter excedente de combustível próprio não necessita de acionamentos.

Atualmente, as indústrias que usam esse tipo de turbina contam com caldeiras com pressões mais elevadas, em comparação com as primeiras caldeiras usadas para esse tipo de tecnologia.

A turbina a vapor em contrapressão necessita que as caldeiras sejam aquatubulares, em virtude da especificação do vapor, abre-se a possibilidade de contar com um conjunto mais diversificado de combustíveis, como lenha, carvão mineral, resíduos industriais e agrícolas, desde que sejam utilizadas unidades equipadas com grelha (CLEMENTINO, 2001).

As caldeiras aquatubulares são munidas de vários sistemas de circulação de água, que passam pelas suas paredes recebendo a energia térmica da queima do combustível. Conforme visto na figura 12 o vapor gerado é inserido diretamente na turbina gerando energia elétrica e mecânica, onde o vapor resultante é utilizado no processo sem nenhum retorno ou recuperação, ou seja, nas turbinas de contrapressão, o vapor que deixa a turbina é inserido diretamente no processo industrial, onde o termo “contrapressão” se refere ao fato do vapor ser rejeitado quando se encontra numa pressão próxima à pressão atmosférica. O fato do vapor estar em alta pressão aumenta o rendimento térmico, porém diminui o rendimento elétrico (CASTRO, 2009).

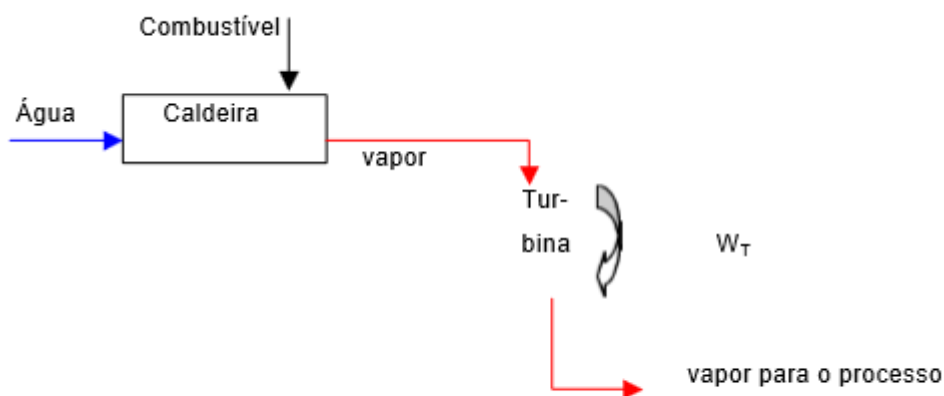


Figura 12. Sistema com turbina de contrapressão.  
Fonte: VELÁZQUEZ, 2000.

O setor que mostra-se como um dos maiores unidade de cogeração é o sucroalcooleiro, ou seja, tanto as destilarias autônomas como as usinas de açúcar, há anos praticam a cogeração, em virtude de utilizarem uma quantidade substancial de vapor de baixa pressão consumida nos processos de aquecimento, evaporação e destilação, aliada à necessidade de trabalho nos setores de moagem e geração elétrica, fornecido por turbinas de contrapressão.

Pode se alcançar melhores ganhos na geração de energia elétrica se forem eliminados gargalos no train dos equipamentos acionados a vapor, fazendo as turbinas trabalharem em condições nominais de pressão, portanto no seu ponto de maior rendimento. A instalação de multiválvulas e acessórios correlatos nas turbinas garantem pressões nominais na entrada da expansão da máquina.

Para produzir excedentes de energia elétrica seria utilizar difusores ao invés de moendas. A consequência mais importante é a eliminação quase total da necessidade de potência na moagem, apesar do aumento da demanda de calor para aquecimento da massa de cana. Nesse caso, a demanda de vapor passa a ser de baixa pressão, permitindo através de uma troca das caldeiras atuais por outras mais eficientes de pressões elevadas, a ampliação dos excedentes de energia elétrica (CLEMENTINO, 2001).

No Ciclo Rankine a água entra em fase líquida comprimida na bomba e é enviada à um gerador de vapor, onde ela sofre um superaquecimento devido à combustão dos materiais da caldeira, obtendo-se vapor superaquecido que é injetado na turbina gerando trabalho e expandindo, saindo em uma pressão mais baixa onde ela entra em um condensador que trocará calor com a vizinhança. Por fim o líquido deixa o condensador e entra novamente na bomba para que o ciclo seja reiniciado (PANOSSO, 2003).

As perdas nas bombas ocorrem principalmente devido às irreversibilidades que se associam com o deslocamento do fluido, já as perdas no condensador são pequenas se comparadas com toda a perda de energia do sistema. Existem também as perdas causadas pelo atrito do fluido com as paredes das tubulações, perdas para o meio ambiente dos componentes de processos não adiabáticos e até mesmo perdas causadas por vazamento de ar no condensador (PANOSSO, 2003).

Apesar do baixo rendimento do Ciclo Rankine, existem maneiras de se aumentar o seu rendimento, são elas:

- superaquecimento do vapor;

- aumento da pressão no fornecimento de calor ao gerador de vapor;
- redução da pressão de saída da turbina.

Este último implica em uma redução da temperatura na saída da turbina, que irá gerar um teor maior de umidade.

## 2.5.2 Turbina a vapor a condensação

Neste sistema o valor na saída da turbina é direcionado somente para o condensador, onde posteriormente irá retornar a caldeira. Este sistema pode ser aplicado onde o processo de produção da indústria não necessita de vapor e que tenha combustível barato.

Como mostra a ilustração a seguir, todo o vapor que sai da turbina à baixa pressão é inserido no condensador e reaproveitado para ser novamente aquecido e comprimido para voltar ao processo de geração de energia. Como visto, não há aproveitamento do vapor de saída para o processo produtivo (CLEMENTINO, 2001).

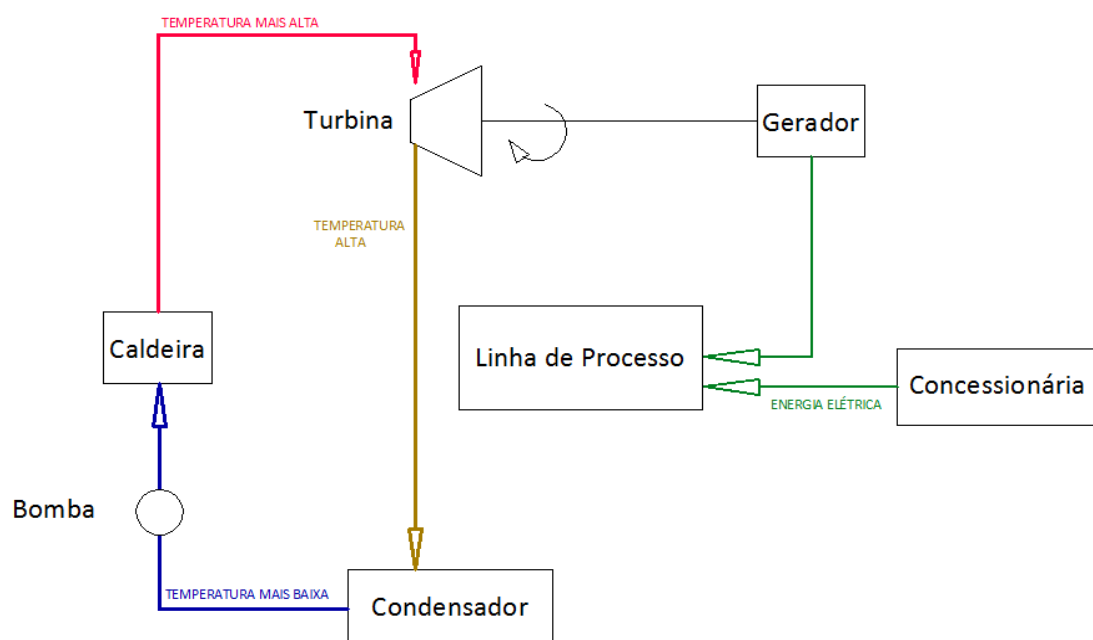


Figura 13. Sistema com turbina a vapor a condensação.

Fonte: CLEMENTINO, 2001.

### 2.5.3 Turbina de condensação e extração

Neste sistema de cogeração existem pontos de derivação de pressões intermediárias na turbina, os quais extraem calor para atender ao processo produtivo. No futuro, com o desenvolvimento de novas tecnologias, existe uma tendência de efetuar investimentos em caldeiras de alta pressão (63 a 85 kgf/cm<sup>2</sup>) e em turbinas de condensação. Um exemplo é o setor sucroalcooleiro que pode chegar a uma produção de 50 a 100 kWh/tonelada de cana moída em excesso, podendo triplicar essa energia se forem utilizadas as pontas e palhas (barbojo) da cana no período de entressafra (CLEMENTINO, 2001).

Este tipo de configuração é muito utilizados nas indústrias que necessitam de vapor, pois ele é reaproveitado de várias maneiras após ceder energia às pás da turbina do gerador. O vapor em baixa pressão é reutilizado na linha de produção, onde podem haver tratamentos deste dependendo da necessidade do sistema, o restante é condensado e reutilizado no sistema através de um condensador seguido de uma bomba para comprimir o fluido que será entregue à caldeira. Dessa maneira pode-se dizer que a turbina de condensação e extração é uma junção do sistema do Ciclo Rankine e da turbina de condensação.

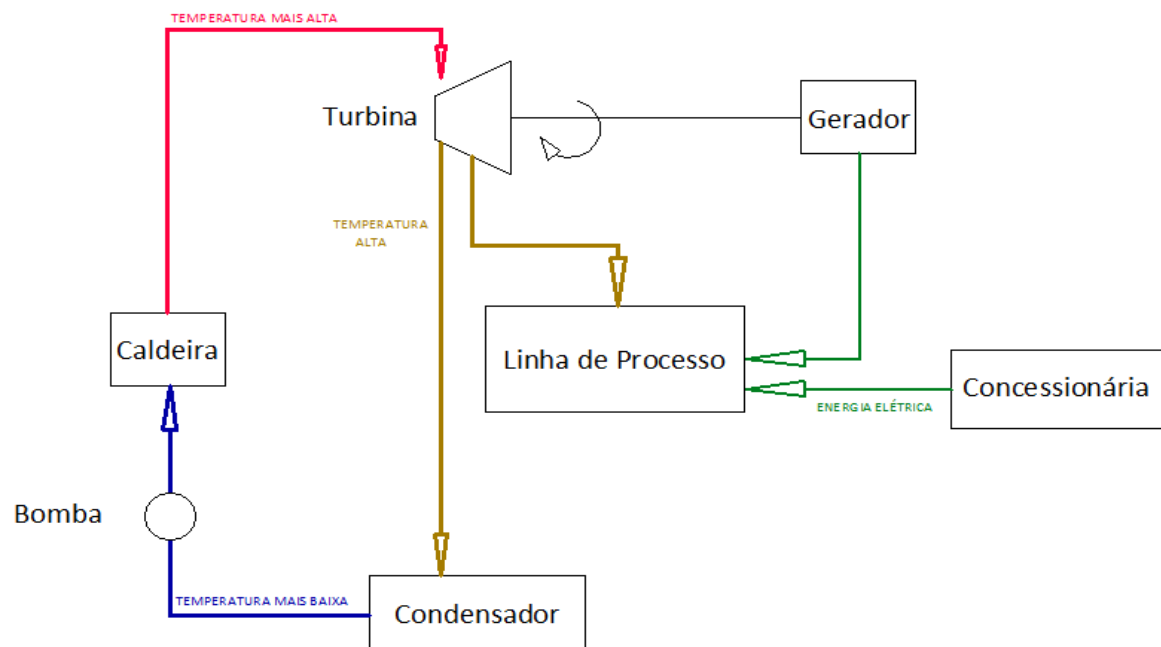


Figura 14. Sistema com turbina de condensação e extração.

Fonte: CLEMENTINO, 2001.



## 2.5.4 Turbina a gás simples

Este sistema de geração de energia elétrica tem despertado grande interesse, pois suas características mais importantes são:

- capacidade de expansão modular;
- simplicidade na implantação dos módulos;
- menor tempo de comissionamento;
- investimento reduzido;

A característica principal de uma turbina a gás é a exigência de um combustível puro, nobre, que pode ser gasoso como o gás natural, ou de processo, como líquido, como o diesel, querosene, *Light CycleOil* (LCO) e outros óleos que não podem entrar nas máquinas com impurezas e contaminantes. Caso se deseje utilizar óleos residuais, os investimentos e os custos operacionais serão onerados, em função da necessidade de instalações periféricas para o tratamento do óleo. Este sistema de turbina a gás simples é chamado também de Ciclo Brayton (CLEMENTINO, 2001).

Outra característica deste sistema é a grande quantidade de energia necessária no compressor, que pode estar na faixa de 40% da potência desenvolvida na turbina, em contraste com o Ciclo Rankine, em que é necessária apenas 1 ou 2% da energia da turbina para acionar a bomba que retorna o vapor condensado para a caldeira.

Um dos fatores que tornam as turbinas à gás muito adequadas à cogeração é que os gases de escape, além de apresentarem grandes volumes e temperaturas elevadas, possuem apreciáveis teores de oxigênio. Ao contrário da aparente perda de rendimento térmico, este fato pode propiciar (CLEMENTINO, 2001):

- a geração de vapor por meio do acoplamento de uma caldeira de recuperação ao escape da turbina;
- a utilização direta dos gases em processos de secagem, pré-aquecimento de fornos, notadamente nos setores petroquímico, cimento e cerâmico;
- fonte de calor de sistemas de refrigeração de condicionamento ambiental

O funcionamento da turbina à gás simples é basicamente um compressor, uma câmara de combustão e a turbina. Na sua maneira mais simples de funcionamento, o compressor absorve o ar da atmosfera e o comprime, injetando-o em alta pressão na câmara de combustão, onde ele irá se misturar com o combustível. Após isto, irá

ocorrer a combustão que produzirá gases quentes que irão escoar expandindo-se e movendo as pás da turbina e do eixo do compressor (COSTA E LIMA, 1997).

O rendimento em geral de turbinas a gás varia entre 18 % a 35 %, variando com os seguintes fatores:

- temperatura do ar de aspiração na turbina;
- altitude da instalação;
- perdas de carga na admissão do ar e na saída dos gases de escape;
- regime de funcionamento da turbina.

O rendimento pode ser melhorado se a temperatura do ar de combustão for maior, ou seja, se estes gases forem pré aquecidos. Os gases que são expelidos podem ser utilizados indiretamente na produção do vapor para o processo produtivo ou outras necessidades de calor.

Os gases de saída podem ser utilizados de forma direta através de secadores com atomização ou secadores em estufas de fornos metalúrgicos. Como será abordado mais a diante, é possível melhorar ainda mais o rendimento do sistema a gás através do uso de uma turbina de recuperação à vapor (COSTA;LIMA, 1997).

O Ciclo Brayton é o ideal para a utilização de turbinas à gás que tenham aplicações aeronáuticas, devido ao fato de possuírem após a turbina uma velocidade elevada. A turbina é geralmente aplicada ao eixo de um compressor, para que a energia mecânica seja aproveitada para a geração de trabalho. Em aplicações estacionárias (não aerodinâmicas) a turbina à gás é projetada para ter uma velocidade de saída dos gases menor após a turbina (VELÁZQUEZ, 2000).

Na ilustração da figura 15 pode-se ver o funcionamento de uma turbina a gás simples com ciclo aberto.

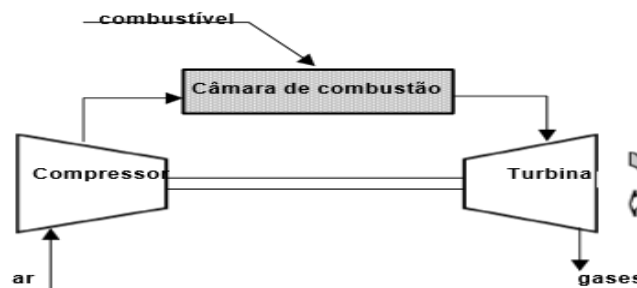


Figura 15. Sistema com turbina a gás simples.  
Fonte: VELÁZQUEZ, 2000.

### 2.5.5 Turbina a gás com injeção de vapor

No início da década de 1980, surgia a opção da turbina a gás com injeção de vapor, já em utilização para o carvão gaseificado. Este sistema permite um melhor aproveitamento de toda a energia térmica, melhorando o rendimento global de um sistema com turbina à gás. Consiste nos mesmos elementos da turbina à gás simples, mas com a utilização de uma caldeira de recuperação e uma turbina à vapor. A seguir será mostrado o esquema de uma turbina a gás em ciclo combinado com caldeira de recuperação, cujo vapor na saída é aproveitado no processo (CLEMENTINO, 2001).

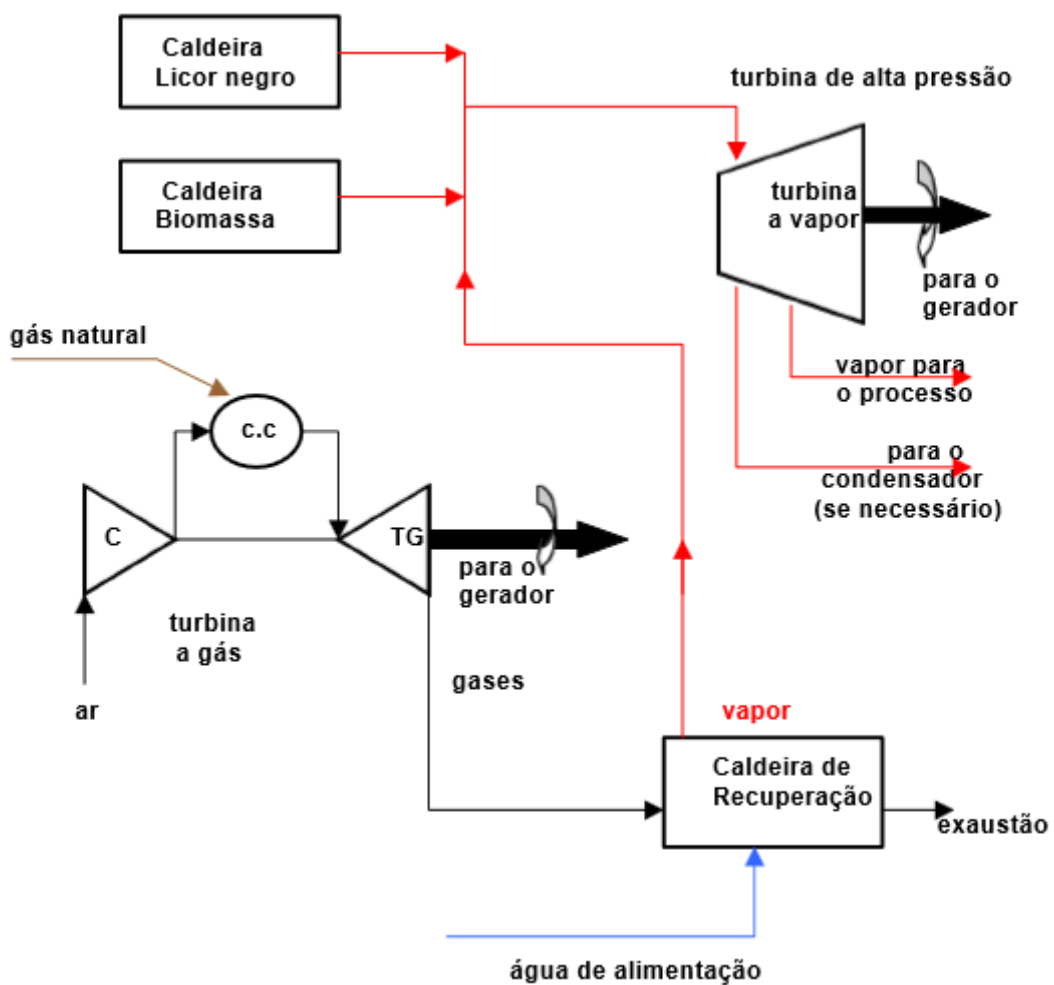


Figura 16. Sistema com turbina a gás com injeção de vapor.

Fonte: VELÁZQUEZ, 2000.

Com a entrada no mercado das turbinas aeroderivativas foi introduzido o sistema de reinjeção do vapor na própria turbina a gás, ou seja, o vapor advindo da caldeira de recuperação transfere calor para os gases a alta pressão que deixam o

compressor. Este fato proporciona uma geração complementar de eletricidade no próprio gerador principal, além de reduzir a emissão de óxidos de nitrogênio. Os gases de saída da turbina a gás são utilizados na caldeira de recuperação onde aquecem a água suprindo vapor para a turbina em alta temperatura. Após o uso do vapor em alta pressão para geração de energia na turbina, ele é reaproveitado na linha de produção onde será novamente bombeado e reaproveitado na caldeira de recuperação (CLEMENTINO, 2001).

Com este tipo de sistema, pode-se diminuir significativamente a quantidade de gases poluentes na atmosfera devido à combustão do gás, como por exemplo resíduos nitrogenados e sulfurosos que geram gases nocivos à atmosfera e à saúde das pessoas. Nas caldeiras de recuperação existe um fator que afeta a sua eficiência chamado de “*pinch-point*”, que é a menor diferença entre os gases e a temperatura que se verifica na entrada do evaporador (COSTA; LIMA, 1997).

O sistema combinado pode ser apresentado pelo esquema a seguir:

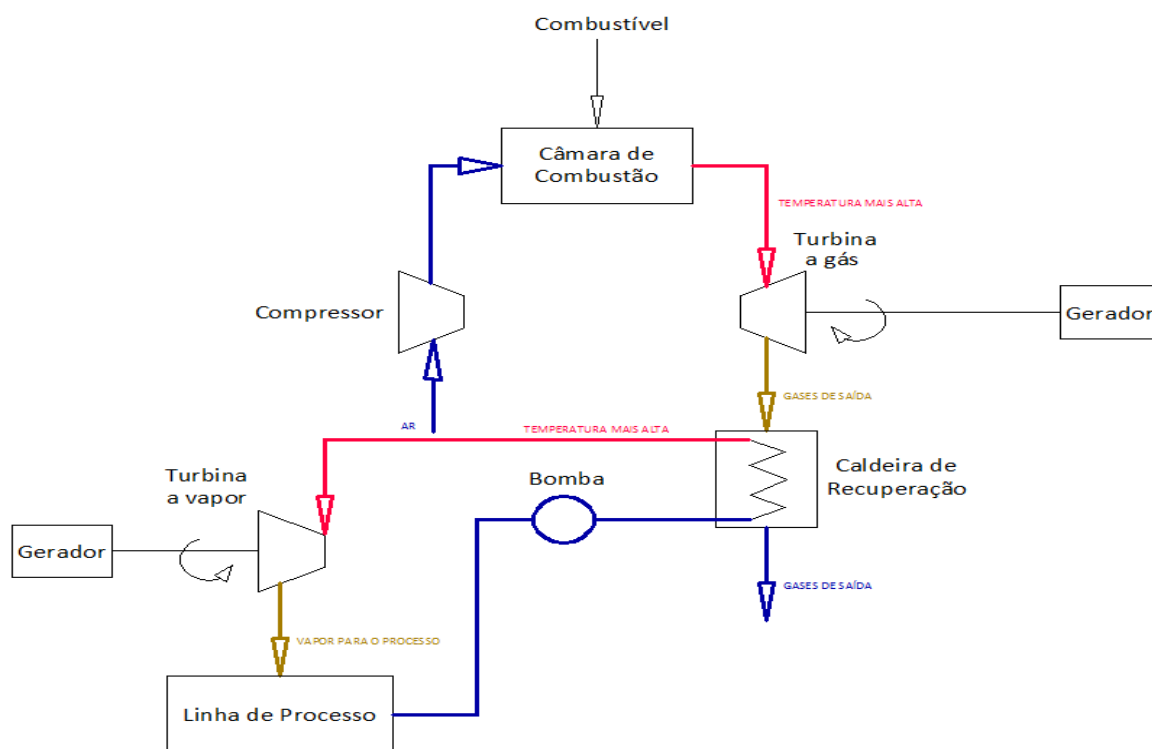


Figura 17. Sistema com turbina a gás com injeção de vapor com reaproveitamento do vapor do processo.

Fonte: CLEMENTINO, 2001.

As unidades aeroderivativas permitem aumentar a disponibilidade operativa da instalação, devido às características do projeto do equipamento, como por exemplo,

alta confiabilidade, tempo reduzido de manutenção e elevado rendimento, com as substituições de subconjuntos completos em poucas horas. A consequência desses fatores é que as unidades se tornam atrativas para aplicações em cogeração e geração elétrica apenas, sendo que neste último caso são mais apropriadas para atendimento de picos de demanda ou funcionamento em regime de emergência.

Em todos os sistemas de cogeração vistos até o momento pode-se complementar a carga térmica da exaustão da turbina por meio da queima de combustível adicional, tanto nas caldeiras de recuperação, gerando mais vapor, como no aquecimento direto, obtendo mais energia. Esta prática permite transferir o calor para utilizações em que se necessita de maiores temperaturas, a exemplo dos fornos, como também permite de maneira mais facilitada a compatibilização entre as demandas de carga térmica a jusante e de energia elétrica, com as possibilidades totais de oferta da máquina. O gás apresenta-se como combustível mais apropriado para essas máquinas. A turbina a gás é uma das melhores formas de produzir trabalho com combustíveis gasosos isentos de contaminantes. A figura 18 contempla a reutilização dos gases de exaustão da turbina à gás na câmara de combustão, onde eles irão aumentar a eficiência do sistema devido ao fato de realizarem a reação à uma temperatura mais elevada, ocorrendo perdas menores (COSTA;LIMA, 1997).

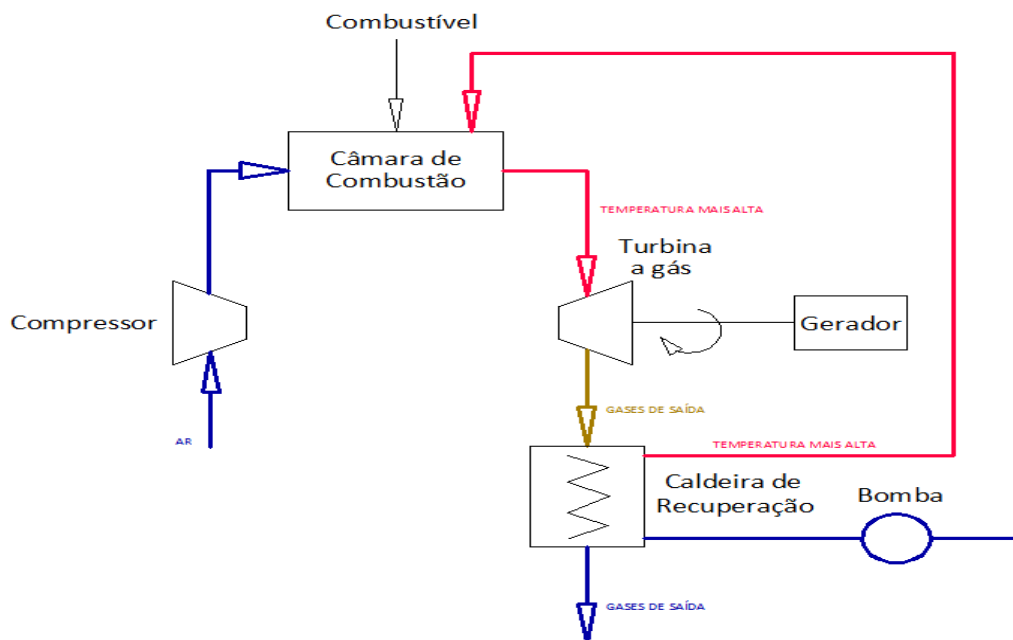


Figura 18. Sistema com turbina a gás com injeção de vapor e aplicação de gases quentes à câmara de combustão.

Fonte: CLEMENTINO, 2001.

O Brasil tem aumentado muito nos últimos anos a utilização de biomassa na geração de energia elétrica, com o uso do bagaço de cana em usinas ou destilarias, cavaco de madeira em indústrias de beneficiamento de madeiras. Normalmente as biomassas são queimadas em caldeiras equipadas com grelha, o que limita o aproveitamento do seu conteúdo energético. As grelhas são utilizadas para que não haja acúmulo de materiais e resíduos na câmara de combustão, pois isto afetaria o rendimento das trocas com as paredes aquatubulares, assim, um motor com um redutor que move muito lentamente o eixo da grelha se encarrega de livrar a caldeira destes resíduos. A conversão desses energéticos em gás combustível através da gaseificação amplia as alternativas para a geração de energia elétrica.

A utilização de gases pobres oriundos da gaseificação atmosférica de sólidos apresenta vantagens e desvantagens quando é comparada com combustíveis fósseis líquidos. A vantagem é que as unidades de tratamento desses gases são a princípio mais simples que as instalações de beneficiamento de líquidos para eliminar resíduos e contaminantes indesejáveis às turbinas a gás. A grande desvantagem é que esses gases possuem um baixo poder calorífico, e devem ser analisados devido à existência de valores mínimos para a estabilidade de operação da turbina.

O sistema BIG/STIG é um sistema que consiste em uma turbina a gás alimentada por gaseificadores pressurizados de biomassa em leito fluidizado, a sigla vem de *Biomass Integrated Gasifier / Steam Injected Gas Turbine*. Este sistema vem sendo estudado perante a sua viabilidade a partir de resultados de projetos em escala de demonstração com o carvão, madeira e turfa (CLEMENTINO, 2001).

O sistema BIG/ISTIG é um outro sistema que difere do BIG/STIG devido ao fato de possuir um resfriador intermediário no compressor. São alcançados maiores rendimentos, maior produção de energia por tonelada de biomassa, e menos custo de capital unitário. A sigla desse sistema vem de *Biomass Integrated Gasifier / Intercooled Steam Injected Gas Turbine*.

No sistema BIG/ISTIG, estima-se um aumento de 10 a 15% na produção de energia elétrica, o que, tomando o exemplo de uma usina de açúcar resultaria em até 800 kWh/tonelada de cana. Mas, deve-se lembrar que quanto mais eficiente é o processo de geração de eletricidade utilizando a turbina a gás com injeção a vapor, menor será a produção de vapor para o processo produtivo.

A título comparativo avalia-se que para o caso da cana de açúcar como biomassa, que tem como sistema o BIG/STIG, a máxima produção de vapor por

tonelada de cana seria de 300 kg/tonelada de cana. Já para o sistema BIG/ISTIG a máxima produção seria de 235 kg/tonelada de cana.

A seguir será mostrado o sistema BIG/STIG, ou seja, do sistema com turbina a gás com injeção de vapor integrado a gaseificador de biomassa, onde as cinzas são removidas no gaseificador e ciclo filtro, e em seguida removidas as partículas sendo aplicadas diretamente na câmara de combustão com a utilização da caldeira de recuperação realimentando os seus gases de entrada à uma temperatura mais elevada (CLEMENTINO, 2001).

É importante ressaltar que para que a biomassa seja utilizada na alimentação das câmaras de combustão de turbinas a gás no caso do BIG/STIG, ela deve ser gaseificada e limpa. Para que a produção de energia possa ocorrer da maneira mais eficiente possível, os gases de exaustão precisam ser reaproveitados em sistemas que necessitem de calor ou na própria geração de vapor para o processo. No processo abaixo descrito na figura, o sistema BIG/STIG, os gases de exaustão da turbina irão produzir vapor na caldeira de recuperação antes de serem emitidos à atmosfera, sendo que parte do vapor produzido será entregue ao processo da fábrica, outra parte poderá ser utilizada no gaseificador e também uma parte que poderá ser injetada na câmara de combustão (VELÁZQUEZ, 2000).

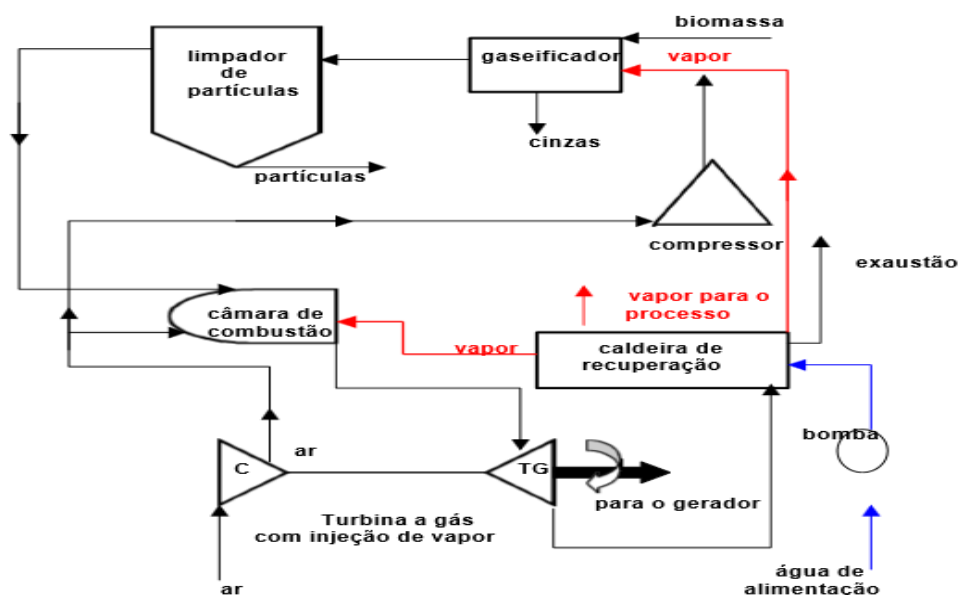


Figura 19. Sistema BIG STIG.  
Fonte: VELÁZQUEZ, 2000.

O sistema do BIG/ISTIG utiliza o resfriamento do ar que será comprimido devido ao fato de ele reduzir o seu volume específico, necessitando de menos energia

para a sua compressão disponibilizando mais potência para a turbina. Este tipo de sistema também aumenta a eficiência termodinâmica do ciclo, pois como o ar que sai do compressor é utilizado para a refrigeração das palhetas e partes metálicas da turbina, isso permitirá que a turbina opere com temperaturas maiores dos gases de entrada após a combustão sem atingir os seus limites. A aplicação dos sistemas do BIG/STIG e BIG/ISTIG são viáveis por possuírem pouca sensibilidade à potência instalada, sendo viável tanto em pequenas plantas quanto em plantas maiores. Porém, uma desvantagem é que a planta precisa de uma fonte hidráulica e recursos hídricos devido ao fato da água não ser reaproveitada novamente no ciclo, isso inviabiliza a utilização desta tecnologia em algumas regiões do país como, por exemplo, no nordeste e até mesmo no centro sul. Também é importante ressaltar que a qualidade que o vapor deve possuir para que a turbina possua operação adequada e tenha vida útil grande é muito rígida, sendo assim, a planta deve ser um investimento pesado em equipamentos que desmineralizem a água e façam o seu tratamento de resíduos, para que o vapor seja o mais puro possível (NETO, 2001).

Segue a ilustração do sistema BIG/ISTIG na figura 20, ou seja, do sistema com turbina a gás com injeção de vapor e resfriador intermediário.

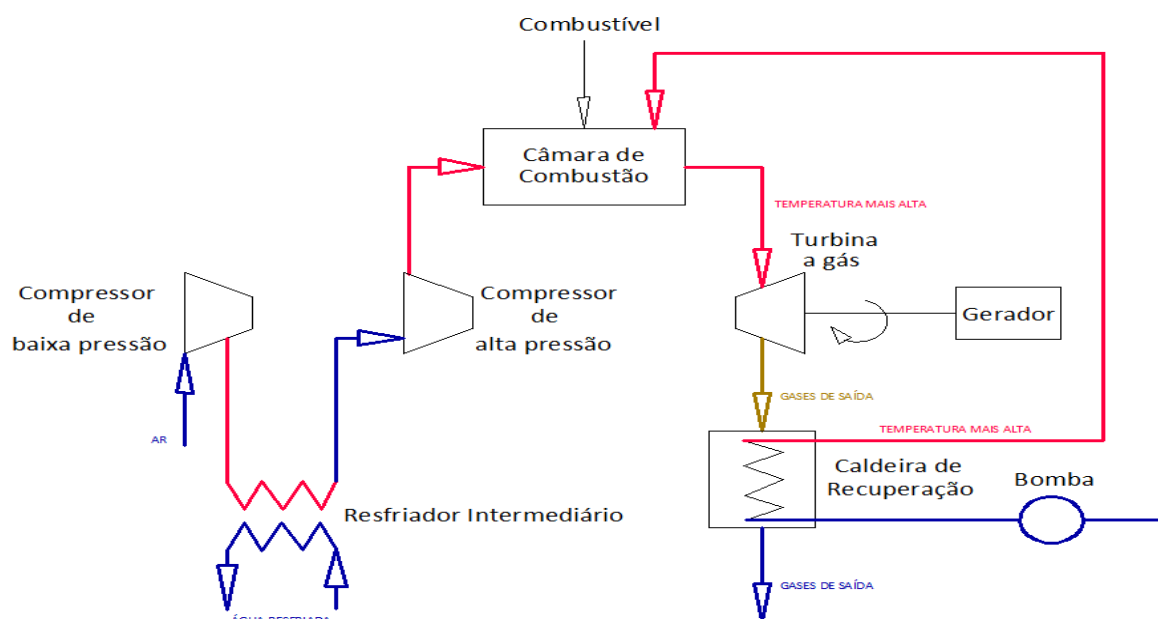


Figura 20. Sistema BIG/ISTIG.  
Fonte: CLEMENTINO, 2001.



## 2.6 FONTES DE ENERGIA UTILIZADAS NO BRASIL

Nos últimos anos houve um aumento na utilização de fontes de energia renováveis, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2012), estes valores chegam a ser próximos de 45 % de toda a matriz energética. Porém em 2011, houve uma pequena queda na utilização de fontes renováveis devido à diminuição da safra de cana de açúcar neste período. Em comparação com outros países, pode-se ver na figura 21 como o Brasil possui uma boa utilização de fontes renováveis de energia elétrica.

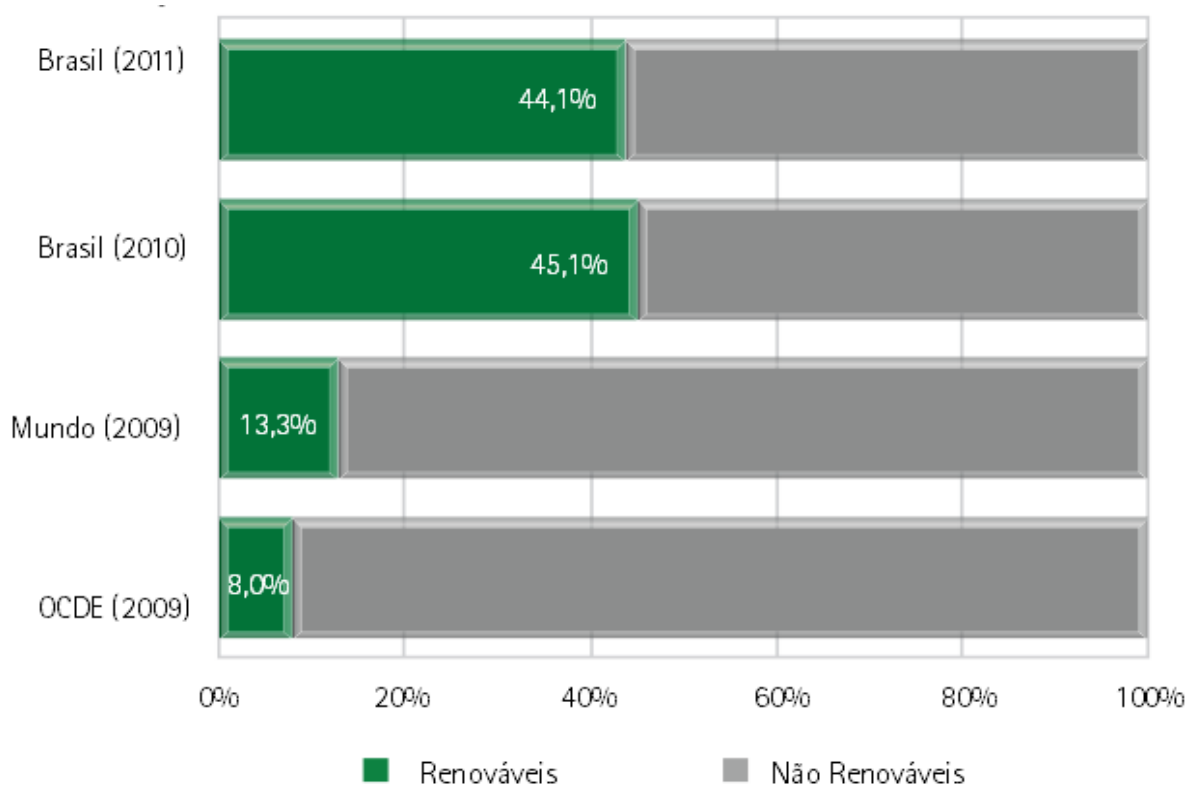


Figura 21. Percentuais de utilização de fontes renováveis no Brasil e no mundo.

Fonte: BEN, 2012.

Em termos de poluição e emissão de gases para a atmosfera, a maior parte foi emitida pelo setor de transportes. A emissão de CO<sub>2</sub> no Brasil é pequena se comparada com outros países, se for feita uma comparação por habitante, um brasileiro emite 4 vezes menos CO<sub>2</sub> do que um europeu, 9 vezes menos do que um americano e menos da metade que um chinês (EPE/BEN, 2012).

Tendo em vista a utilização da energia no país, segundo o Balanço Energético Nacional de 2012 a repartição da oferta interna de energia é mostrada na figura 22:

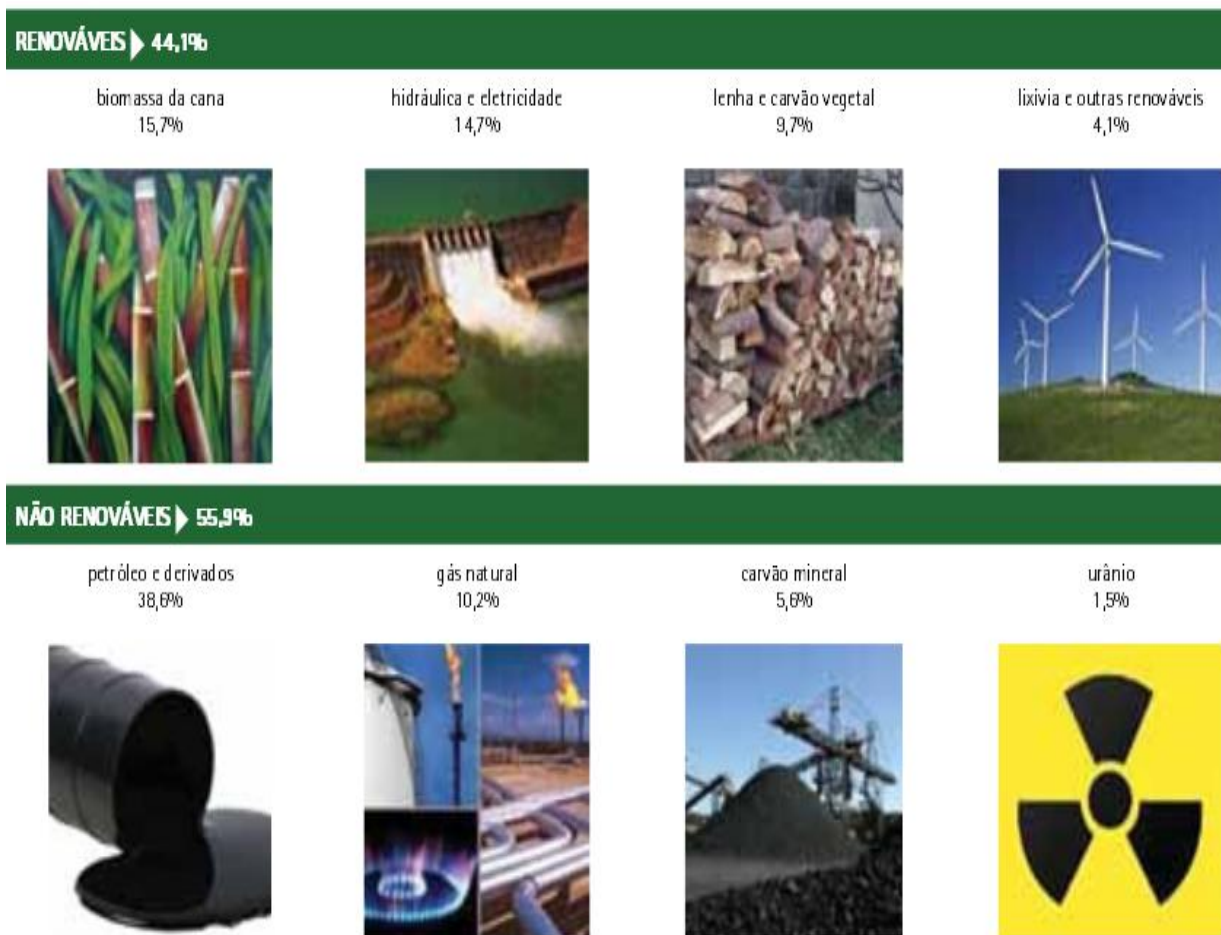


Figura 22. Repartição de oferta de fontes de energia no Brasil em 2011.

Fonte: EPE / BEN, 2012.

A cogeração surge devido ao fato das indústrias corresponderem a 35,8 % da energia no Brasil, bem como as residências que correspondem a 9,4 %, esses percentuais permitem entender a grande procura pela eficiência na utilização da energia, pois pequenos percentuais de economias, podem refletir em grandes quantidade de energia poupada que podem ser utilizadas para crescimento das indústrias no país (EPE/BEN, 2012).

Nas indústrias a energia pode ser consumida de várias maneiras, através da queima de lenha e outros tipos de biomassa para aquecer caldeiras que produzam vapor para o processo produtivo, através de gás na cogeração, óleo diesel para uso de grupos moto-geradores no horário de ponta e outras fontes de energia mostradas na figura 23.

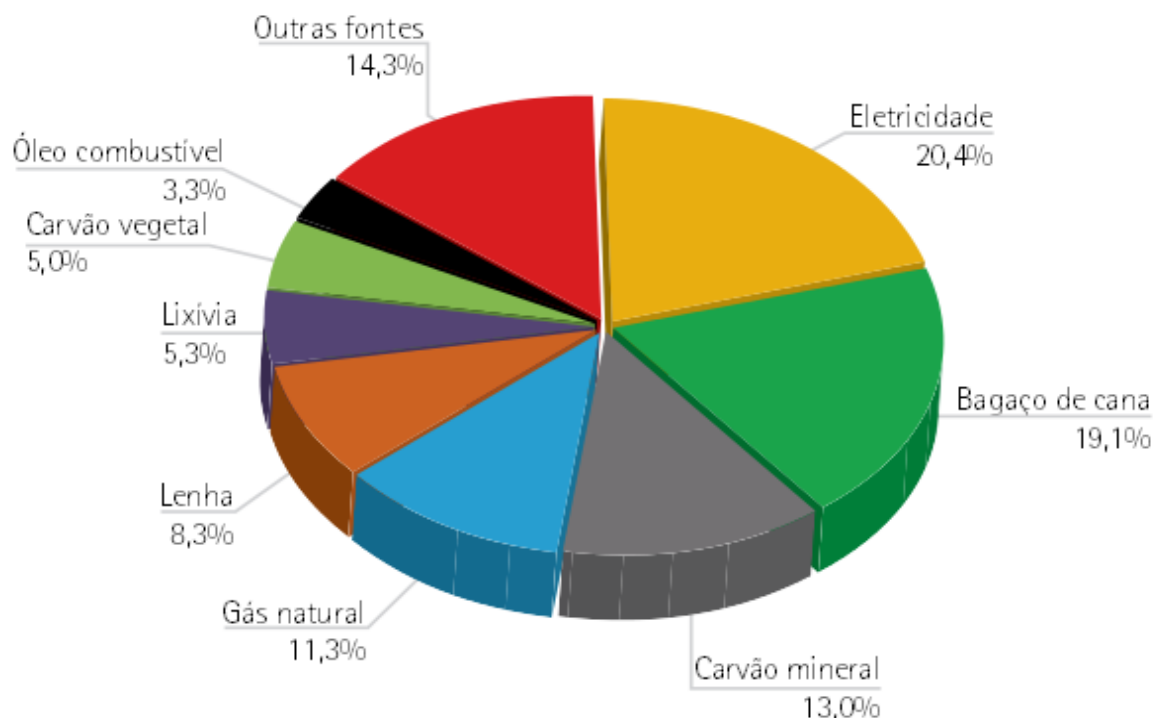


Figura 23. Percentuais da utilização de diferentes tipos de fonte de energia.  
Fonte: EPE / BEN, 2012.

Segundo o Balanço Energético Nacional, BEN, em 2011 a biomassa representou 6,6 % de todas as fontes de energia do país, enquanto a geração de energia por hidrelétricas lidera com 81,9 %. Comparativamente com as fontes termelétricas a biomassa representa 37,4 % dos combustíveis utilizados, em segundo lugar a utilização de gás natural com 24,9 % (EPE/BEN, 2012).

## 2.7 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA COGERAÇÃO

Os tipos de segmentos do setor industrial que utilizam a cogeração utilizam os combustíveis que melhor se adaptam à viabilidade econômica da planta, como por exemplo, o setor sucroalcooleiro que utiliza as próprias sobras de cana para a queima na caldeira e conseqüente geração de vapor e energia elétrica. Na figura 24 serão mostradas as utilizações de combustíveis por setor industrial (COGEN, 2013).

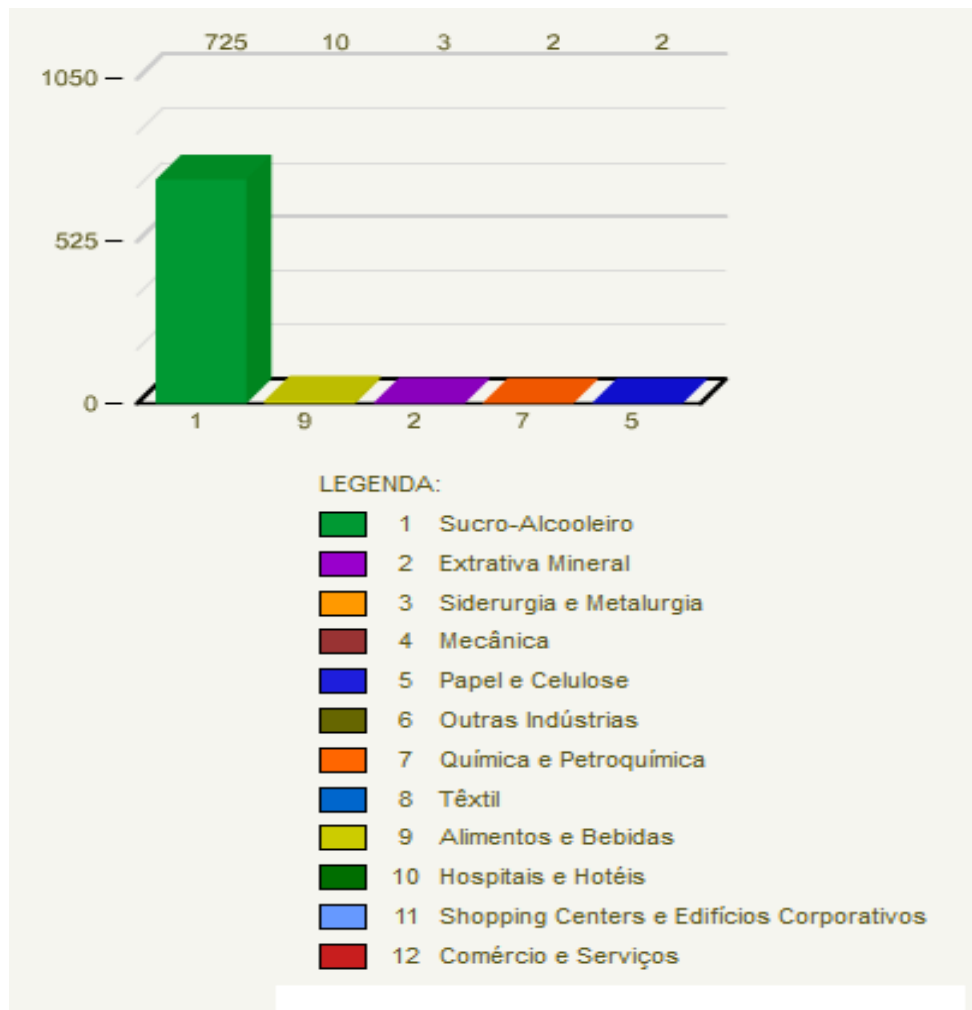


Figura 24. Unidades de cogeração que utilizam biomassa a partir da cana de açúcar.

Fonte: COGEN, 2013.

A utilização de gás natural se destaca em uma variedade de setores conforme a figura 25. O setor de petroquímica é o que mais utiliza o gás natural, devido ao fato de ele ser obtido no processo de extração do petróleo. Ele é muito utilizado para queima por ser de fácil obtenção, gerar menos resíduos e ser menos poluente e emissor de CO<sub>2</sub>. Em segundo lugar o gás natural que é utilizado para a cogeração nos edifícios corporativos e shopping centers. O gás natural também pode ser obtido através de biodigestores que são alimentados com fezes de animais e água, onde as bactérias fazem o processo de decomposição originando como produto final o gás metano e sobras que podem ser utilizadas como adubo.

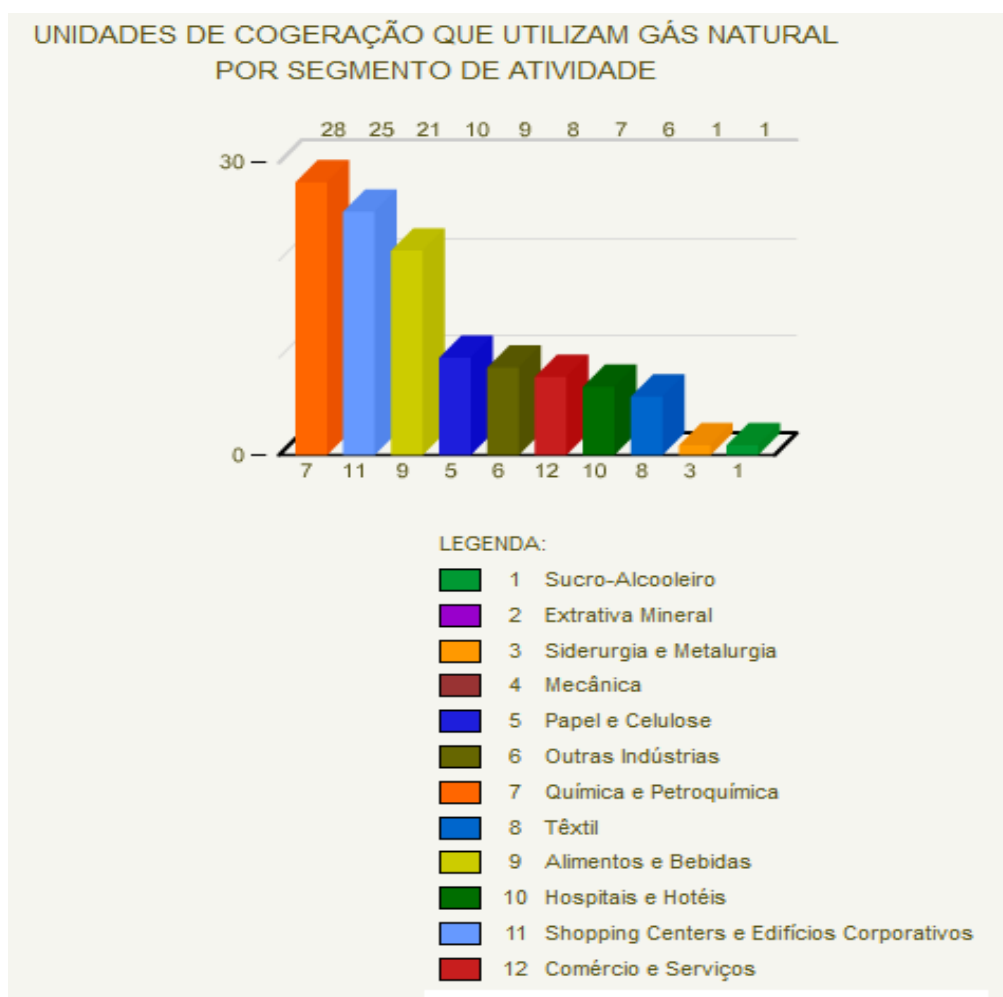


Figura 25. Unidades de cogeração que utilizam gás natural.

Fonte: COGEN, 2013.

A utilização de óleo diesel vem sendo menos viável devido ao aumento do seu preço, e por emitir muitos poluentes. Porém, em alguns setores da indústria ainda é utilizado como meio de cogeração, onde o calor do processo da geração de energia pode ser reaproveitado para fins específicos de cada setor como, por exemplo, aquecimento de piscinas e de água para banho.

A sua utilização se destaca principalmente em hotéis e edifícios corporativos e na indústria petroquímica conforme a figura 26.

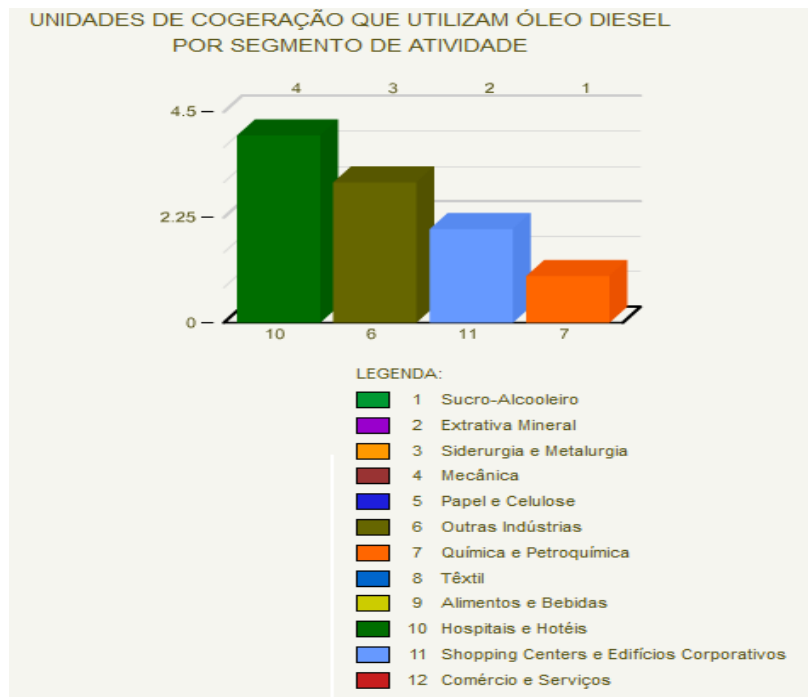


Figura 26. Unidades de cogeração que utilizam óleo diesel.

Fonte: COGEN, 2013.

Outros combustíveis também são utilizados como, por exemplo, cascas de arroz, restos de madeira e outras sobras de processos fabris conforme mostra a figura 27.

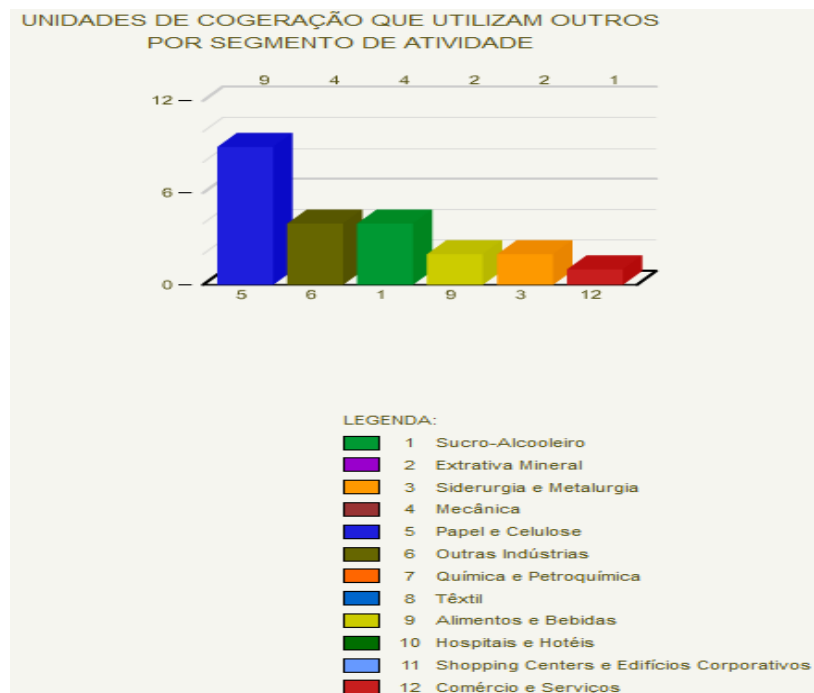


Figura 27 - Unidades de cogeração que utilizam outros tipos de combustíveis.

Fonte: COGEN, 2013.

### **2.7.1 Biomassa**

A biomassa é um recurso renovável oriundo de matéria orgânica de fontes vegetais ou animais. Assim como as outras fontes renováveis, é uma forma indireta de utilização de energia solar, pois as plantas utilizam o sol para gerar alimentos e nutrientes através da fotossíntese gerando a energia química.

A sua grande vantagem é que apesar de possuir um baixo rendimento relativo, a sua queima pode ser feita diretamente em caldeiras e fornos. A biomassa exige um grande investimento inicial, não sendo viável em instalações de porte muito elevado devido ao custo de seu transporte, já que possui densidade baixa. Isto apenas não se aplica ao setor sucroalcooleiro, onde a biomassa encontra-se já nas proximidades do local de sua queima.

A grande preocupação com o meio ambiente é um incentivo para a utilização de biomassa, já que a sua emissão de gás carbônico é novamente aproveitada no crescimento das fontes vegetais de biomassa. Outro ponto importante é o incentivo através do crédito de carbono (SILVA, 2009).

## **2.8 A COGERAÇÃO DO PONTO DE VISTA TÉCNICO**

Em princípio, a cogeração é aplicável a qualquer instalação na qual se necessita duas formas de energia citadas anteriormente: energia elétrica e energia térmica. A demanda térmica pode ser calor direto (“sopro” quente), vapor, água quente, óleo quente e refrigeração. Esta última pode ser obtida a partir da energia elétrica, e nesse caso se traduz em demanda elétrica. Porém a cogeração traz de volta o sistema de refrigeração por absorção, que gera água gelada a partir de uma fonte quente, mais usado em lugares que não dispõem de eletricidade. Traz de volta no sentido de que por ser a cogeração uma alternativa de autoprodução em instalações nas quais existe grande demanda térmica em relação à demanda elétrica, a substituição do sistema de refrigeração com compressores, acionados por motores elétricos, por sistemas de refrigeração por absorção, alimentados por vapor, água quente, “sopro” quente ou queima direta, favorece o balanço termelétrico desejável para viabilizar economicamente a cogeração.

Para a alternativa de cogeração encontrar aspectos que a viabilizem tecnicamente é conveniente que o cliente tenha demanda de energia térmica (vapor, calor ou frio) pelo menos duas vezes maior do que a equivalente de energia elétrica. Essa relação pode mudar um pouco, mas, por exemplo, uma fábrica que drena cerca de 5 MW de potência elétrica e cerca de 15 toneladas por hora de vapor estaria numa posição muito favorável para adotar a cogeração. Isso ocorre porque a relação entre energia elétrica e energia térmica geradas via turbina ou motor se mantém aproximadamente constante e elas precisam ser aproveitadas ao máximo para garantir a alta eficiência do sistema.

Entretanto, o uso de queima suplementar na caldeira ou de chillers elétricos pode ajudar a ajustar a relação de demandas (elétrica e térmica) do cliente à relação entre as potências térmica e elétrica cogeradas.

Outro fator que deve ser levado em conta na avaliação técnica da aplicabilidade de um sistema de cogeração é a temperatura do “sopro” quente a ser aproveitado. Se a opção for a configuração em que se gera inicialmente energia elétrica por um acionador a combustão, a temperatura dos gases de exaustão pode chegar a 450°C, no caso de motores, ou a 550°C no caso das turbinas. Isso limita a aplicação dessa alternativa, que se tornaria inadequada para temperaturas muito acima dessa faixa, como é o caso, por exemplo, da indústria de vidro, em que a temperatura do processo está acima de 1000 °C.

Já o setor de cerâmica branca, que possui secador para a pasta obtida pela mistura dos componentes minerais (argilas, saibro etc.) em base d'água, tem implementado a cogeração com turbinas a gás natural nos países de grande tradição e importância no mercado mundial desse produto, como é o caso da Espanha e da Itália, exatamente porque as temperaturas dos processos de secagem (chamado de *spray dryers* ou *atomizers*), normalmente por queima direta de gás, e o excesso de ar são muito próximos dos encontrados nos gases de descargas das turbinas, permitindo o total aproveitamento destes ao mesmo tempo em que é gerada toda a energia elétrica demandada pela planta (BARONCINI; CHIARINI, 1995).



## **2.9 CASOS DE SUCESSO DA COGERAÇÃO**

No cenário nacional e internacional temos inúmeros casos que obtiveram e ainda obtém sucesso na aplicação da cogeração em plantas industriais e comerciais. Serão abordados primeiramente casos nacionais de sucesso visando proporcionar uma visão clara do êxito em plantas brasileiras. No Brasil, houve uma grande expansão do número de plantas de cogeração, como exposto em capítulos anteriores, no final dos anos 90 e início dos anos 2000.

### **2.9.1 Casos Nacionais**

#### **- Hotel Sheraton (Rio de Janeiro – RJ)**

Planta de cogeração de 1660 kW, visando suprir a demanda de energia elétrica, vapor e frio de toda a instalação. A instalação é composta de motores de 830 kW movidos a gás natural acoplados em geradores (Revista Brasil Energia nº 211,1998).

#### **- Refresco Guararapes – Fábrica da Coca Cola**

Planta de cogeração de 3600 kW, visando suprir a demanda de energia elétrica, e toda a energia térmica da planta. A instalação até então composta de dois moto geradores a gás de 1700 kW cada (Revista Brasil Energia nº 221, 1999).

#### **- Shopping Center Taboão (Taboão da Serra-SP)**

Planta de cogeração composta de quatro moto geradores a gás totalizando 3600 kW de capacidade instalada, garantindo 14 horas diárias ao Shopping Center Taboão (Revista Brasil Energia nº 261, 2002).

#### **- Shopping Jardins (São Paulo-SP)**

Planta de cogeração composta por chiller de absorção, que aproveita os gases de exaustão de dois geradores de 1300 kW. Este chiller também aproveita a água do sistema de arrefecimento dos geradores, gerando um total de 636TR em carga térmica de resfriamento. A capacidade total de cogeração com gases de exaustão e água quente de arrefecimento de geradores, neste caso, é de 950TR, mas por questões de ampliação, optou-se por um chiller de absorção menor. Com a instalação deste

sistema de co-geração, a demanda de energia elétrica do shopping reduziu 776kW (Tuma, 2013).

#### **- Shopping Interlagos (São Paulo-SP)**

Planta de cogeração que totaliza 3832 kW de capacidade instalada (ECOGEN BRASIL, 2013).

### **2.9.2 Casos internacionais**

#### **- Oxford Cogeneration Facility (Kern - CA – U.S.A)**

Planta de cogeração de 5600 kW composta de dois turbo geradores de 2800 kW. Em operação desde 1984 até o momento (Power Plant Jobs, 2013).

#### **- South Belridge Cogeneration Facility (Kern - CA – U.S.A)**

Planta de cogeração de 94,2 MW composta de três turbo geradores de 31400 kW. Em operação desde 1985 até o momento (Power Plant Jobs, 2013).

#### **- Ace Cogeneration (San Bernardino - CA – U.S.A)**

Planta de cogeração de 108 MW composta por um turbo gerador. Em operação desde 1990 até o momento (Power Plant Jobs, 2013).

#### **- Watson Cogeneration (Los Angeles - CA – U.S.A)**

Planta de cogeração de 405 MW composta por quatro turbo geradores de 82 kW e dois turbo geradores de 38,5 kW Em operação desde 1987 até o momento. (Power Plant Jobs, 2013).

### **3 ESTUDOS REALIZADOS NA EMPRESA DE BENEFICIAMENTO DE MADEIRA**

#### **3.1. A EMPRESA**

O parque fabril consiste de inúmeros motores para compactação, corte, desfibração para o tratamento das toras, ou seja, para tratamento da madeira em estado bruto. Dessa forma, a energia despendida para estes processos é consideravelmente grande, sendo que a área de beneficiamento de madeiras é uma das maiores consumidoras de energia em se tratando de visão nacional.

Os tipos de energia que o processo de beneficiamento de madeira necessita são:

- Elétrica;

Basicamente usa-se a energia elétrica para acionamento dos motores, bombas e usos gerais da indústria, assim como para alimentação do setor administrativo, já que a administração da fábrica encontra-se na mesma planta. O sistema de climatização praticamente independe de energia elétrica, somente usada para este fim em situações pontuais e indiferentes no quesito de potência. Ou seja, a energia elétrica para climatização é usada pontualmente em alguns equipamentos simples de ar condicionado (evaporadora – condensadora). Será visto adiante que o sistema de climatização é realizado por chillers de absorção.

- Mecânica;

Largamente usada nos processos para o tratamento da madeira em estado bruto, tendo origem de energia elétrica (através de motores) ou de sistemas de compressão (através de vapor).

- Vapor;

Usado basicamente para alimentar as linhas de alta pressão da fábrica e uso direto nas madeiras em estado bruto para melhor desfibramento posterior.

A central térmica a que a citação anterior se refere, é a planta de cogeração, a qual é o objetivo deste estudo.

### 3.2. PLANTA DE COGERAÇÃO

A planta de cogeração é composta por um complexo sistema de aproveitamento e reaproveitamento de vapores provenientes de processos ligados ao beneficiamento de madeira. Basicamente, o início do processo de cogeração consiste em uma entrada de água tratada para a caldeira.

O controle de pH, resíduos sólidos, níveis de substâncias é extremamente rigoroso, pois o que é considerado potável não pode ser o mesmo para o uso em uma caldeira de grande porte, haja vista que o vapor gerado transitará em inúmeras tubulações compostas por diferentes materiais.

Após o tratamento rigoroso da água, esta é bombeada para a caldeira principal, caracterizando a próxima etapa do sistema de cogeração. A caldeira aquece a água até a mesma se transformar em vapor, e este é reaquecido para atingir pressões determinadas para o uso na planta fabril ou na entrada da turbina de cogeração. Nesta etapa é gerado vapor em diferentes pressões para o uso posterior, havendo sistemas de condensação e reaproveitamento após o uso deste vapor, atingindo um rendimento global da planta próximo de 93%. Este rendimento é considerado um dos maiores da América do Sul, pois a característica do beneficiamento de madeira é a grande utilização de vapor em diferentes pressões nos processos. O consumo médio de combustível (biomassa) utilizado pela caldeira para geração de energia é de 4,26 Toneladas/MWh, porém além da energia elétrica, é gerado também o vapor que é muito mais importante e que torna a cogeração viável do ponto de vista econômico. O combustível utilizado na caldeira será estudado em um capítulo exclusivo e posterior.

Dependendo-se da demanda de vapor da fábrica, a quantidade de vapor na entrada da turbina de cogeração é regulada. O sistema elétrico é composto por um gerador com potência aparente de 15 MVA com fator de potência 0,8. A potência mecânica necessária para este gerador é fornecida por uma turbina a vapor, a qual é alimentada pelo vapor advindo da caldeira. As características completas dos equipamentos serão expostas posteriormente em um tópico dedicado ao assunto.

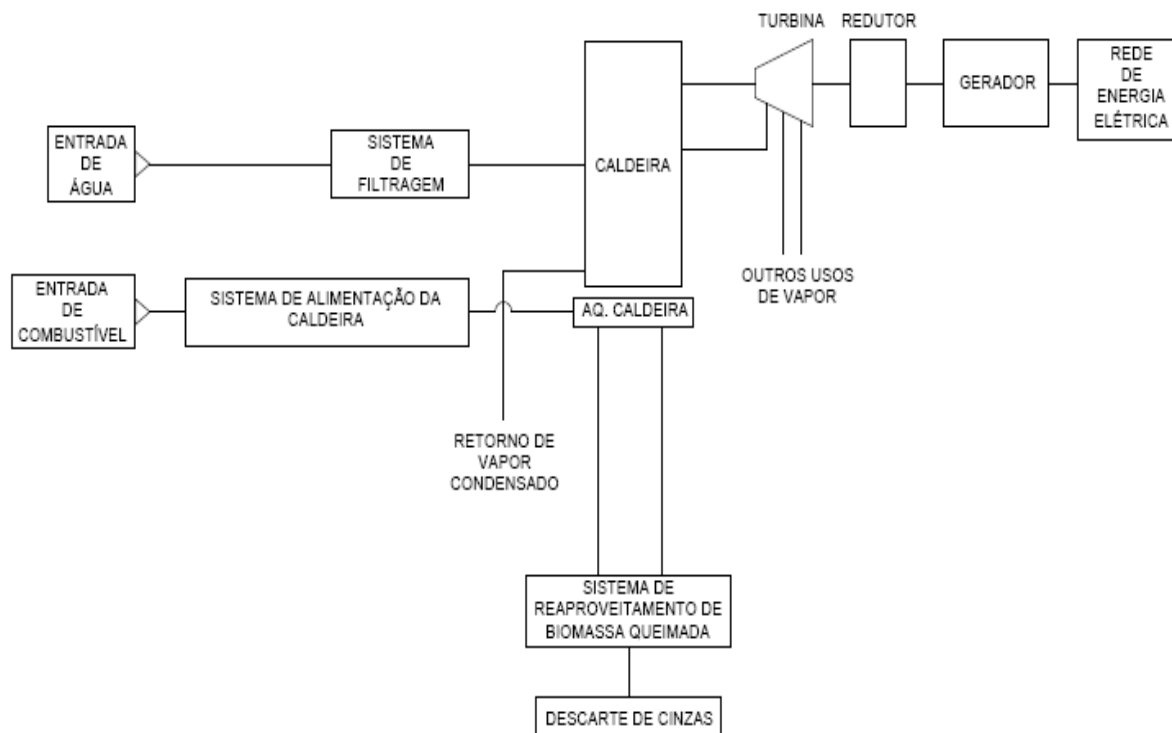


Figura 28 - Diagrama em blocos da planta de cogeração da empresa.  
 Fonte: Empresa de Beneficiamento de Madeira, 2013.

### 3.2.1. Tratamento da água de alimentação da caldeira

Devido à presença de sais minerais e íons na água, é preciso que ela seja tratada antes de entrar na caldeira, para evitar a deterioração dos encanamentos por onde passar, o comprometimento do sistema de bombeamento e danos às pás da turbina.

Primeiramente, a água que é fornecida pela companhia de água é armazenada em grandes reservatórios, onde será bombeada até o sistema de tratamento que removerá os íons de cloro da água. Em seguida, a água passa pelo filtro catiônico que remove todos os seus sais e a sílica. A água não pode conter mais que 20 ppm de sílica, caso esse limite seja excedido, pode haver formação de pedras dentro dos encanamentos e nas pás da turbina. A capacidade do sistema de desmineralização é de 25 m<sup>3</sup>/h.

Sendo respeitados os limites em p.p.m dos sais presentes na água, ela estará preparada para ser injetada na caldeira a uma pressão de 130 kgf/cm<sup>2</sup> através de uma bomba composta por um motor trifásico de indução com potência de 800 HP.

### 3.2.2. Caldeira

A água bombeada antes de chegar até a caldeira passa pelo desareador, que remove todo oxigênio que está misturado na água para evitar a oxidação. A água passa por um pré-aquecimento onde sua temperatura é elevada para 280°C e então é injetada na caldeira aquatubular. O interior de uma caldeira com grelha pode ser visto na figura 29.



Figura 29 – Interior de uma caldeira com grelha.  
Fonte: Fimaco do Brasil, 2013.

No interior da caldeira é feita a combustão da biomassa que é dosada conforme a necessidade de vapor do sistema, onde ela é depositada sobre uma grelha, que lentamente separa a biomassa da areia e das cinzas. O calor que é gerado no centro da caldeira é transferido para a suas paredes que são compostas por vários tubos de diâmetro pequeno, onde a água pré-aquecida, tratada e desareada foi injetada, os seus tubos por onde a água passa pode ser visto na ilustração da figura 30.

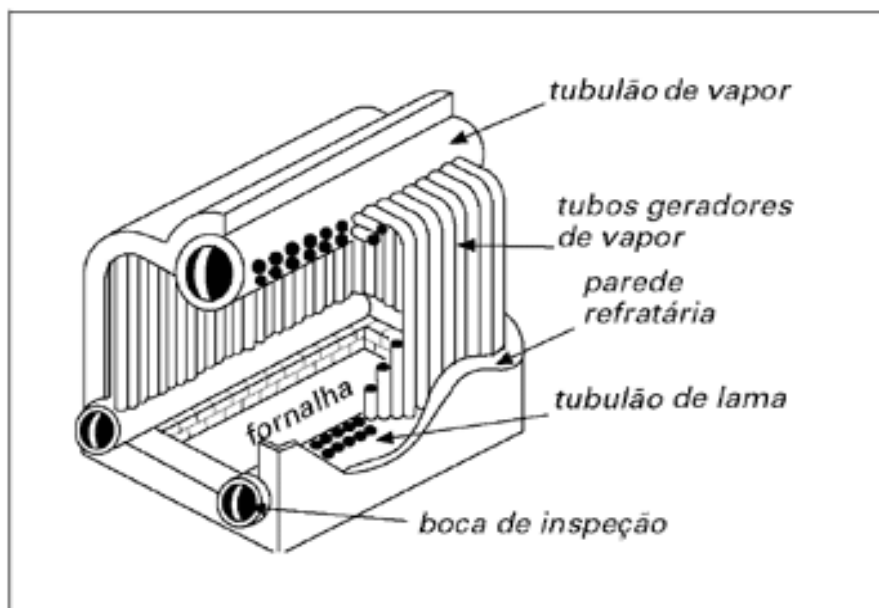


Figura 30 – Ilustração do interior das paredes de uma caldeira aquatubular  
 Fonte: CHD Válvulas, 2013.

Os gases que foram gerados na combustão são expelidos da caldeira a uma alta temperatura, e o seu calor é aproveitado no secador de fibras, no aquecedor de óleo da prensa, no pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira, e no aquecimento do ar injetado na reação de combustão da biomassa. Apenas uma pequena quantidade de gases é expelida para a atmosfera.

### 3.2.3. Geração de vapor

A água que circula pelas paredes da caldeira aquatubular em pequenos tubos recebe energia da combustão da biomassa. Todos estes tubos convergem na saída da caldeira para uma tubulação maior, onde todo o vapor que foi gerado passa por ele. O vapor nesta etapa se encontra em uma temperatura de 300°C a uma pressão de 87 kgf/cm<sup>2</sup> e está na condição de saturado.

O vapor na condição de saturado não pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, pois assim que tocar uma superfície mais fria ele irá condensar. Por este motivo, todo o vapor saturado que sai da caldeira passa por um balão onde haverá uma troca de calor que elevará a sua temperatura para 515°C na mesma pressão de 87 kgf/cm<sup>2</sup>, assim ele está preparado para ser injetado na tubulação de

alimentação da turbina do gerador. A capacidade da caldeira é de produzir até 90 toneladas de vapor por hora.

### 3.2.4. Geração da energia elétrica

O sistema é caracterizado como **BOTTOMING CYCLE VAPOR-TURBINA**, estudado anteriormente no capítulo 2. O vapor que está em alta pressão e alta temperatura é conduzido por uma tubulação até a turbina, que opera com uma rotação nominal de 10.800 rotações por minuto. É acoplado mecanicamente um redutor com engrenagens com potência de 11,7 kW e fator de serviço de 1,30, para reduzir à rotação da turbina para 1.800 rotações por minuto, que é o giro nominal do gerador síncrono de quatro polos. A energia mecânica aplicada pelo vapor em alta pressão no eixo da turbina é convertida em energia elétrica ativa que é injetada no barramento de distribuição da empresa e vendida no mercado livre de energia elétrica. Este gerador é uma máquina síncrona de 4 polos, com potência de 15 MVA, da marca WEG, rendimento de 97 %. O seu estator é ligado em estrela com tensão de geração de 13.800 V e corrente nominal de 627,6 A, a sua excitação é do tipo Brushless sendo injetada uma tensão contínua (DC) de aproximadamente 31V com uma corrente de 8A.

O gerador é programado para trabalhar automaticamente com um fator de potência de 0,98, limitado a um valor de no mínimo 0,95. Na turbina são feitas mais duas extrações de vapor para ser utilizado no processo produtivo.

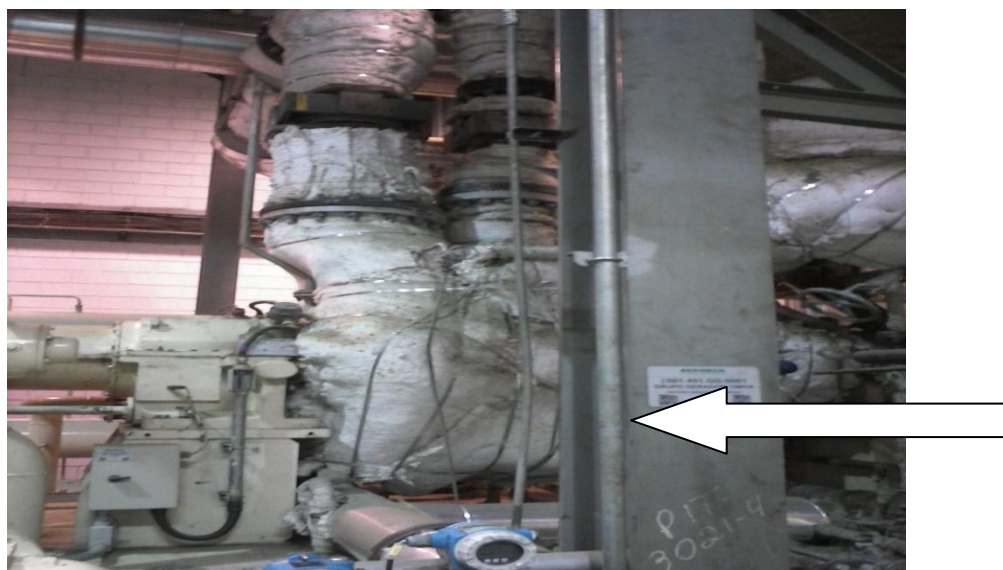


Figura 31 - Entrada de vapor na turbina.

Fonte: Empresa de Beneficiamento de Madeira, 2013.



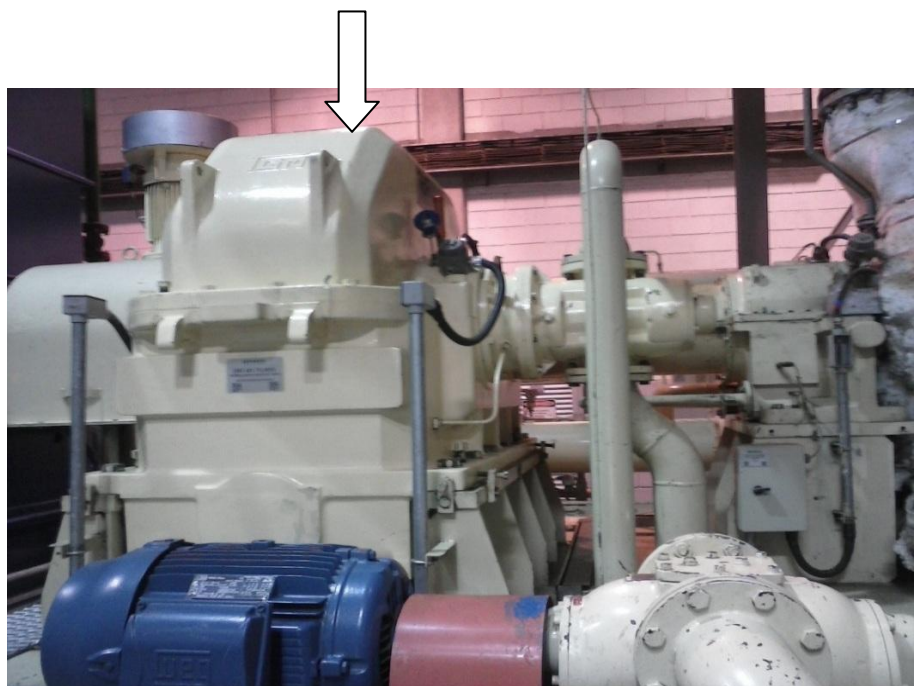


Figura 32 - Redutor de velocidade.  
Fonte: Empresa de Beneficiamento de Madeira, 2013.



Figura 33 - Gerador síncrono.  
Fonte: Empresa de Beneficiamento de Madeira, 2013.

### **3.2.5. Extração de vapor da turbina para o processo produtivo**

O vapor extraído da turbina é encaminhado para a linha de produção, em duas derivações controladas por válvulas. Uma extração é feita à 17 kgf/cm<sup>2</sup> e a outra à 6 kgf/cm<sup>2</sup>. A pressão do vapor, a temperatura e a demanda são controladas por software na sala de controle, em um sistema que permite controlar a injeção de vapor na fábrica, em cada uma das duas derivações, atuando diretamente nas válvulas, na geração de energia elétrica e na produção de vapor da caldeira, estando restritos aos limites máximos de operação. A eficiência total do sistema de cogeração da empresa é de 95 % e foi estimado através de estudos de viabilidade antes de sua implantação.

O vapor é utilizado nas etapas de produção das chapas de MDF e MDP que necessitam de calor e são conduzidos por tubulações até as máquinas que fazem o aproveitamento desta energia. Desta maneira, a indústria não precisa gastar energia elétrica para gerar aquecimento e nem de caldeiras exclusivas para geração de vapor para o processo, a sua cogeração é um processo eficiente, pois quase toda energia injetada na planta é absorvida no processo, tanto na forma de energia elétrica no gerador, quando na forma de energia térmica nos gases de combustão e no vapor rejeitado pela turbina.

A extração de 17 kgf/cm<sup>2</sup> é encaminhada até o setor do MDF onde este vapor será utilizado no cozimento da fibra da madeira antes de ser encaminhada até o desfibrador. Não há retorno de condensado nesta extração, pois a água teve contato direto com a fibra da madeira.

A extração de 6 kgf/cm<sup>2</sup> é encaminhada até trocadores de calor no MDP que farão a secagem de materiais do processo em estufas. Este vapor não sobre nenhum contato direto com a madeira, portanto o seu condensado retorna sem problemas para a caldeira. Existe também um projeto para montar “pulmões” de calor para diminuir as oscilações de temperatura no interior da caldeira. Nesta mesma extração de vapor, é feita uma derivação para chillers de absorção, que condiciona o ar do setor administrativo da fábrica.

### **3.3. UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA E ESTUDO DO COMBUSTÍVEL**

Também chamada de Maravalha de Madeira, esta biomassa é muito utilizada no setor madeireiro para a produção de energia, em virtude de ser uma maneira de reaproveitar restos do processo que seriam descartados. O seu poder calorífico,

segundo levantamento realizado, é de aproximadamente 4,71 cal/g, sendo variável devido à diversidade de componentes que são encontrados na maravalha de madeira.

A biomassa é todo recurso renovável de origem animal e vegetal que tem por finalidade a produção de energia, seja ela elétrica, térmica ou mecânica. Segundo os levantamentos realizados, em 2012 foram consumidas na cogeração 253.190 toneladas de biomassa, gerando ao longo do ano 59.381,50 MWh de energia elétrica. Sendo assim, a quantidade de biomassa necessária para produzir 1 kWh de energia elétrica e mais vapor para o processo é de 4,26 kg/kWh, sendo o preço aproximadamente R\$ 50,00/Tonelada. É importante lembrar que com esta quantidade além de gerar energia elétrica também é gerado o vapor para o processo e que boa parte da biomassa é adquirida internamente no descascador de toras e restos do processo. Cerca de 20 % deste combustível é destinado exclusivamente à geração de energia, ou seja, para o caso de uma cogeração o custo de geração de energia elétrica seria de 20 % de 4,26 Toneladas/MWh multiplicado pelo preço de R\$ 60,00 a tonelada, totalizando aproximadamente R\$ 50,00/MWh.

A biomassa utilizada é de restos de cascas e sobras de madeira, cerca de 50 milhões de metros cúbicos de madeira em tora extraídos por ano na região amazônica produzem apenas 20 milhões de metros cúbicos de madeira serrada. Do total, aproximadamente 60% é desperdiçado nas serrarias durante o processamento primário. Em geral, mais 20% são desperdiçados no processamento secundário, gerando um imenso volume de resíduos. (MMA-Ministério do Meio Ambiente, 2013)

Segundo o Ministério de Minas e Energia, acredita-se que até 2020 a geração de eletricidade por biomassa ultrapasse a 20,10 GW de capacidade instalada. (MME-Ministério de Minas e Energia, 2013)

### **3.4. CLIMATIZAÇÃO COM CHILLERS DE ABSORÇÃO**

O resfriamento do setor administrativo é feito através de chillers de absorção. Consiste em uma máquina térmica que através do calor do vapor consegue internamente obter resfriamento com reações químicas feitas através de sais. Este calor é solicitado pela extração de 6 kgf/cm<sup>2</sup>. O resfriamento é feito através de um sistema central de arrefecimento, que distribui para as diversas salas do setor administrativo.

## 4. ASPECTO ECONÔMICO DA COGERAÇÃO

### 4.1. COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA

A comercialização de energia veio crescendo nos últimos anos, devido ao aumento da demanda por energia elétrica. As comercializadoras compram energia das centrais geradoras (Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs, Usinas Termelétricas – UTEs, parques eólicos e solares) e revendem aos consumidores livres à longo prazo através de um preço fixo de contrato sujeito a reajustes anuais, ou a curto prazo vendendo a energia no preço do PLD – Preço de liquidação das diferenças.

Quando um consumidor compra energia a um preço não estabelecido pelas resoluções homologatórias da ANEEL, ou seja, no ambiente de contratação livre, diz-se que este é um consumidor livre.

#### 4.1.1 Consumidores Livres

Os consumidores livres são aqueles que podem escolher através de um contrato a longo prazo ou a curto prazo o seu fornecedor de energia elétrica, pagando para a concessionária local o uso do seu sistema de distribuição através das Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição estabelecidas pelas resoluções homologatórias da ANEEL.

Os clientes livres são classificados em:

- **convencionais:** são aqueles que possuem demanda contratada maior que 3 MW em qualquer posto tarifário, e que são atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV. Para as unidades ligadas após 7 de julho de 1995 não há restrição do nível de tensão. Este tipo de energia possui um preço menor, porém não há desconto nas tarifas de uso do sistema de distribuição e nem cotas de energia do Programa de Incentivo à Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA).

- **especiais:** são consumidores que compram energia de fontes incentivadas. O preço desta energia é mais cara que a convencional, porém os clientes enquadrados como especiais recebem desconto nas tarifas de uso do sistema de distribuição, e recebem também as cotas de energia do PROINFA.

A energia é contratada em MW médios que é a razão entre o consumo e as horas mensais.

#### 4.1.2 Procedimentos de medição da energia elétrica

Os medidores de energia presentes na adequação para o mercado livre, que enviam as informações para consolidação da CCEE, ou seja, para o sistema de coleta de dados de energia elétrica - SCDE, nos quais a empresa participa, possuem a seguinte descrição do sistema de medição física que pode ser explicado pela figura 34.

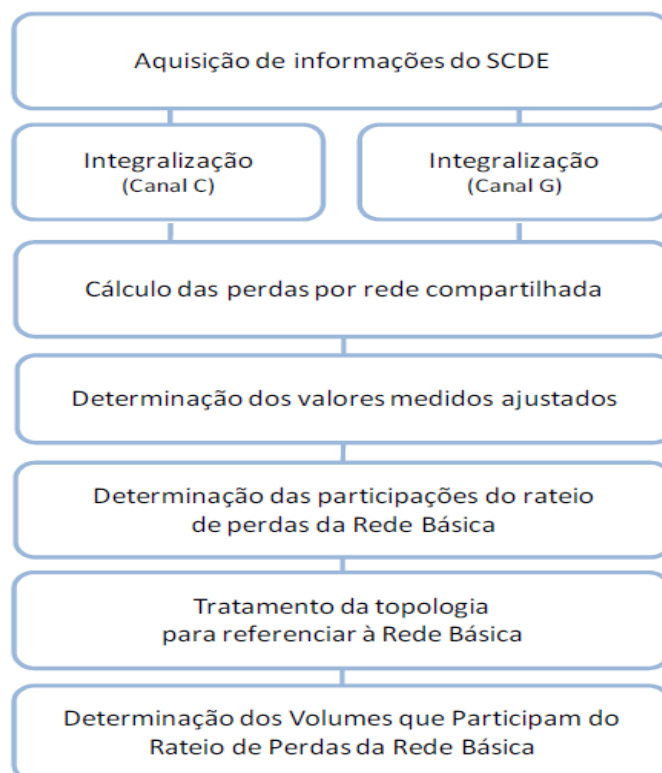


Figura 34 - Esquema geral do módulo de regras.

Fonte: CCEE,2012.

As medidas são obtidas através de dados enviados pelo medidor pelos canais C e G, são integralizados ao longo de uma hora, obtendo o consumo ativo e reativo horário para fins de faturamento. Sobre o valor medido ainda é aplicado 3 % de perdas no sistema de transmissão, este é o valor faturado pela empresa que compra energia no mercado livre.

Se a energia elétrica medida estiver dentro da flexibilidade estipulada pelo contrato que a empresa possui, ela é faturada normalmente ao preço normal de venda da comercializadora. Caso a energia medida seja superior à flexibilidade, a empresa se obriga à comprar o excedente de energia ao preço do PLD que depende do custo

de geração, que está relacionado com os despachos de usinas termelétricas e com a chuva. Esse excedente de energia é encarado como uma exposição, que pode ser boa em épocas que o PLD está baixo, e pode ser muito ruim e trazer grandes prejuízos nas épocas de seca em que o PLD está muito alto.

Se a energia elétrica medida estiver abaixo da flexibilidade de contrato, a empresa ainda possui a vantagem de poder vender ao preço do PLD esta energia que não foi utilizada.

#### **4.2 COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA GERADA PELA COGERAÇÃO DA EMPRESA DE BENEFICIAMENTO DE MADEIRAS**

A Empresa é atendida por uma rede básica exclusiva de 230 kV. O uso do sistema de transmissão é pago às empresas que possuem participação na rede básica.

A energia elétrica que é gerada em um dos estágios da sua cogeração é inteiramente vendida para uma comercializadora. Em razão disto, para o faturamento da energia elétrica consumida pela fábrica, é somada a energia medida na subestação alimentadora e a energia gerada na UTE. A energia elétrica que é consumida é comprada no mercado livre. O diagrama unifilar simplificado de alta tensão pode ser visto na figura 35.

A energia gerada no mês de junho pode ser obtida através do sistema de medidas consolidadas da CCEE (SCDE) que integraliza em 60 minutos a demanda, gerando o consumo ativo e reativo de hora em hora. O gerador possui capacidade de gerar até 12 MW operando com fator de potência de 0,80. Porém o ONS – Operador Nacional do Sistema, exige que o fator de potência da geração injetada na rede básica seja de no mínimo 0,95. A figura 36 mostra a projeção da energia gerada do mês de junho de 2013.

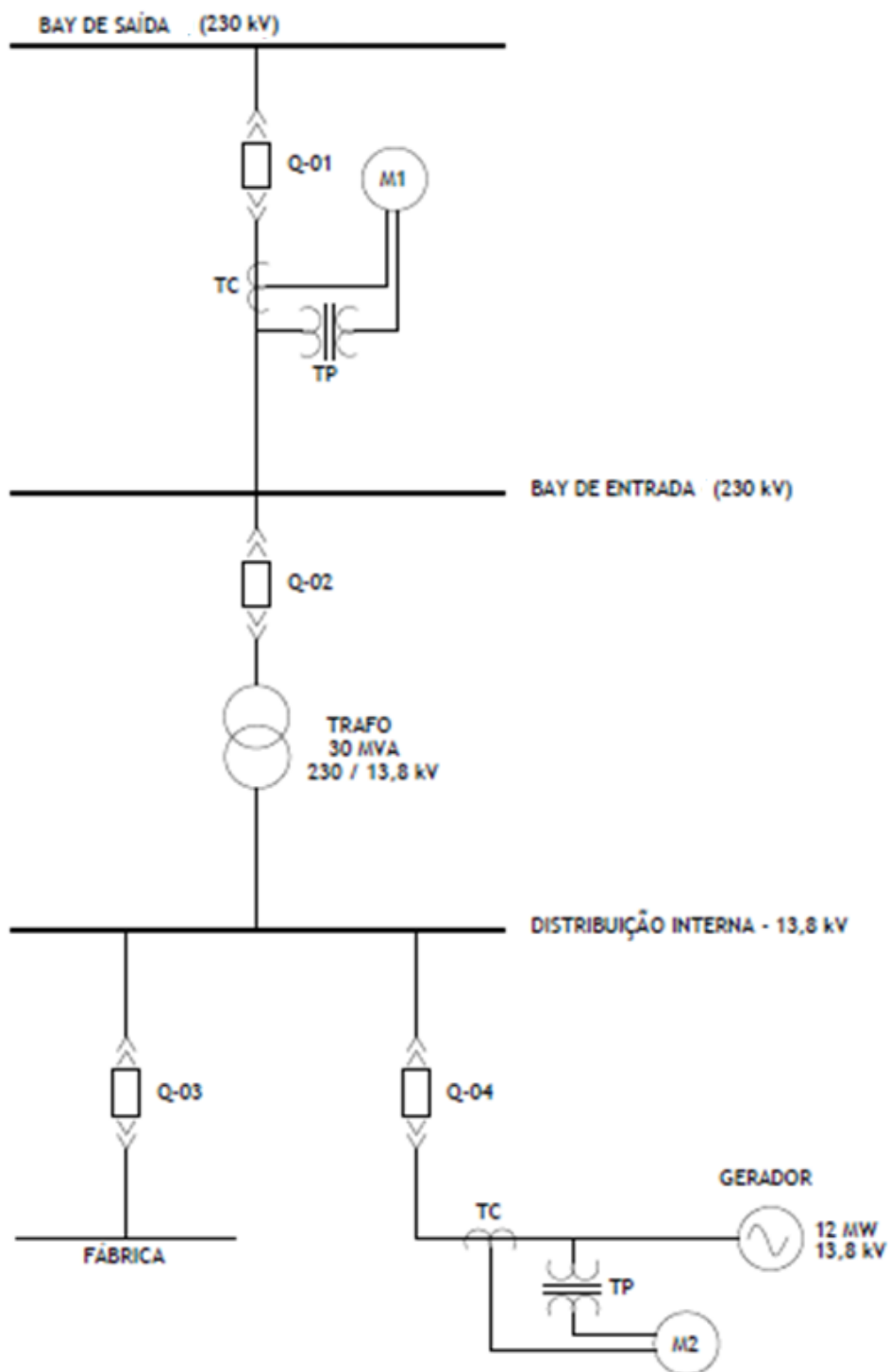


Figura 35 - Esquema unifilar simplificado da rede de média e alta tensão.  
 Fonte: Empresa de Beneficiamento de Madeiras, 2013.

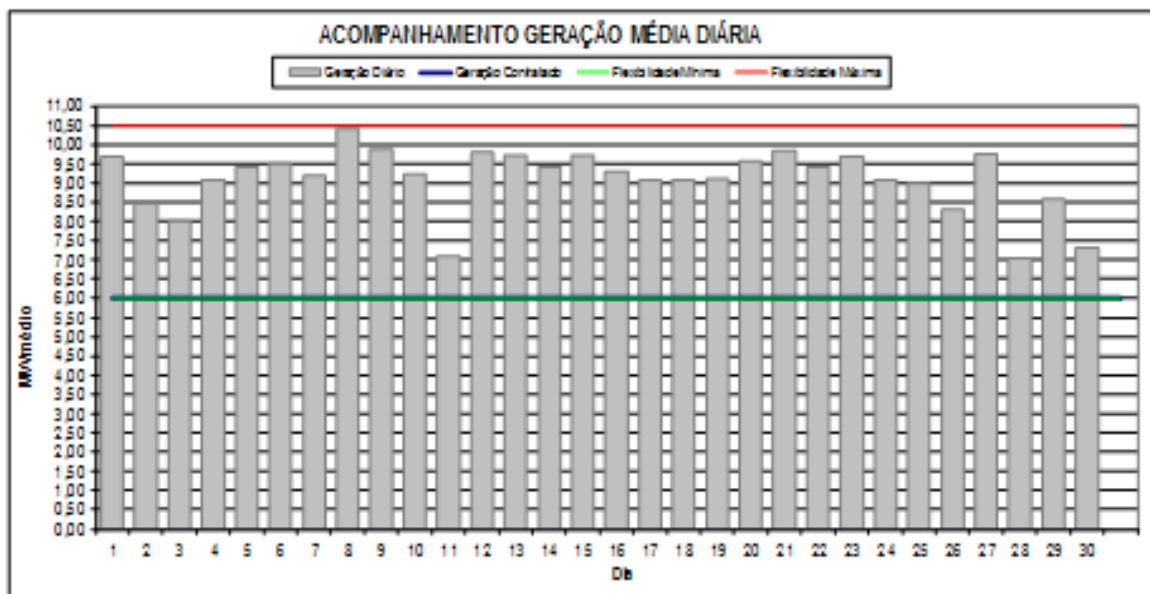


Figura 36 – Projeção da energia gerada em junho de 2013.  
 Fonte: Solfus Engenharia e Conservação de Energia Ltda, 2013.

A produção de energia elétrica que é injetada na rede, exige cadastro na ANEEL, termos de responsabilidade, apresentação de projetos que destaquem as proteções utilizadas, licença ambiental, devida autorização do ONS para gerar energia, cadastro na CCEE, preenchimento de formulário para a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), adequação do sistema de medição, instalação de fibras ópticas para comunicação de dados e a descrição do sistema de cogeração.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de cogeração se torna mais eficiente quando a indústria que a está empregando necessita dos recursos provenientes do calor extraído na turbina e com a venda da energia elétrica gerada. No caso da empresa estudada, o rendimento é muito elevado devido ao fato de ser reaproveitado até mesmo o calor dos gases de saída que são utilizados para readequar a água e os gases de combustão que entram na caldeira, para aquecer o óleo da prensa e secar a fibra do MDF, e o vapor rejeitado pela turbina é empregado para realizar secagem do MDP e cozimento da fibra do MDF, que são um dos processos que mais necessitam de energia elétrica, além de ser empregado também nos chillers por absorção para resfriar os escritórios. Parte do combustível empregado é obtido internamente com as cascas das toras de Pinus processadas no descascador, que a princípio não seriam utilizadas no processo produtivo e poderiam ser descartadas, isso viabiliza ainda mais, porém a maioria da biomassa utilizada é comprada de terceiros.

Se a empresa estudada não possuísse o sistema de cogeração, não venderia a energia gerada e necessitaria gastar energia elétrica para aquecer os trocadores que processam a fibra do MDF, e que secam nas estufas as chapas de MDP. Haveria também os gastos com energia elétrica para manter a refrigeração dos escritórios através de condicionadores de ar e dos resfriadores que seriam mantidos através de chillers elétricos. O seu sistema é poderosamente eficiente devido às tecnologias aplicadas na sua cogeração, o seu ciclo de condensação e extração com aproveitamento dos gases de combustão, a importância do vapor para o seu processo produtivo na produção do MDP e do MDF e a venda de energia tornam a sua cogeração economicamente viável, retornando o investimento realizado e sendo aplicado inclusive em unidades novas.

Com as informações mostradas no decorrer deste estudo, conclui-se que as tecnologias utilizadas são atualizadas e eficientes, aproveitando quase ao máximo o vapor gerado pela caldeira em seus processos e geração de energia elétrica. A estrutura deste estudo, o qual é composta por inicialmente apresentar o conceito de cogeração, e posteriormente apresentar casos de sucesso e o caso de cogeração da empresa, induziu-se o leitor a entender o nível de rendimento da indústria estudada. É importante lembrar que a cogeração não é viável apenas devido à geração, mas sim à demanda de vapor da empresa.

Com relação aos objetivos propostos, podem-se considerar todos como concluídos. Pois o estudo focou-se em apresentar o sistema de cogeração da

empresa, e se fosse o caso, apresentar propostas de melhorias tecnológicas.

Embasando-se no estudo apresentado, pode-se considerar a planta de cogeração um sistema de ponta, em se tratando de América latina.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em 28 de março de 2013.

ACESSA, Disponível em: <[www.acesa.com](http://www.acesa.com)>. Acesso em 29 de julho de 2013.

ALTINO, Luciana M. **Máquinas Síncronas: Teoria e Aplicações**. Pernambuco: Ed. da UFPE, 1984.

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. Florianópolis: ed. da UFSC, 1995.

BARJA, Gabriel J. de A. **A Cogeração e a sua Inserção ao Sistema Elétrico**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BALESTIERE, José Antônio Perrella. **Cogeração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis. ed. UFSC, 2002.

BEN, Balanço Energético Nacional. Disponível em: <[www.ben.epe.gov.br](http://www.ben.epe.gov.br)>. Acesso em: Março, 2013.

BRASIL, Newton P. **Apostila de Cogeração**. Disponível em <[http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc\\_PDF/Apostila\\_Cogeracao\\_Otima.pdf](http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf)>. Acesso em: Abril, 2012.

BRASIL ENERGIA, Revista, várias edições mencionadas.

BRIGHENTI, Claudia R. F.. **Integração do cogrador de energia do setor sucroalcooleiro com o sistema elétrico**. 2003. 169 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CARVALHO, Fabiano da R. **Cogeração e geração distribuída**. Ed. Interciência, 2001.

CLEMENTINO, Luiz D. **A Conservação de Energia por Meio da Cogeração de Energia Elétrica**. São Paulo: Érica, 2001.

COGEN, Associação da Indústria de Cogeração de Energia. Disponível em: <[www.cogen.com.br](http://www.cogen.com.br)>. Acesso em: Abril, 2013.

CENBIO, Centro Nacional de Referência em Biomassa. <[cenbio.iee.usp.br](http://cenbio.iee.usp.br)>. Acesso em: Abril, 2013.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <[www.ccee.org.br](http://www.ccee.org.br)>. Acesso em julho de 2013.

COSTA, Fabiano F.; LIMA, Marcelo T. **Avaliação de potencial de uso de gás natural na região do médio Paranapanema**. 1997. 111 f. Relatório final – Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, 1997.

CASTRO, Rui M. G., **Introdução a Cogeração**. 2009. 2. Ed. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 2009.

CHD Válvulas. Disponível em: <<http://www.chdvalvulas.com.br>>. Acesso em Agosto, 2013.

DEPARTMENT OF RESOURCES, ENERGY AND TOURISM, Australian Government. Disponível em: <[www.ret.gov.au](http://www.ret.gov.au)>. Acesso em: Abril, 2013.

DOS SANTOS, Fernando B. NOVO, Luciana M. A. **Fundamentos teóricos relacionados a cogeração e o exemplo da central de cogeração Infoglobo**.

ECOGEN BRASIL. Disponível em: <[www.ecogenbrasil.com.br](http://www.ecogenbrasil.com.br)>. Acesso em: Agosto 2013.

ENERGY EFFICIENCY GUIDE FOR INDUSTRY IN ASIA. Disponível em:  
<[www.energyefficiencyasia.org](http://www.energyefficiencyasia.org)>. Acesso em: Abril, 2013.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em:  
<[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>. Acesso em Abril, 2013.

Fimaco do Brasil. Disponível em:  
<<http://www.fimacodobrasil.com.br>>. Acesso em Agosto, 2013.

IEA, International Energy Agency. Disponível em:  
<[www.iea.org](http://www.iea.org)>. Acesso em Abril, 2013.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomassa**. Disponível em:  
<<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: Agosto, 2013.

MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Biomassa**. Disponível em:  
<<http://www.mme.gov.br/mme>>. Acesso em: Agosto, 2013.

MOSCARDI, Antônio C.; GRIMONI, José A. B. **Proteção de Planta Térmica operando em Cogeração**. Disponível em:  
<[http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/TEP P%20B-198.pdf](http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/TEP%20B-198.pdf)>. Acesso em: Agosto, 2012.

NOGUEIRA, Luiz H. A. **Cogeração – Uma introdução**. Cia Paulista de Força e Luz. São Paulo, 1994.

NATURAL RESOURCES OF CANADÁ. Disponível em:  
<<http://www.nrcan.gc.ca/home>>. Acesso em: Abril, 2013.

NETO, Vicente C. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. Rio de Janeiro – RJ. 2001. 174 f. Tese (Mestrado em ciências em planejamento energético) - Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ,2001.

PANOSSO, Giancarlo C. **Métodos de simulação para ciclos Rankine**. 2003. 168 f. Dissertação (Mestre em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PORTUGAL. **PDIS - Biomassa e cogeração**, Lisboa, 2013. 23 p.

PORTAL DA MADEIRA, disponível em: <portaldamadeira.blogspot.com.br>. Acesso em Julho, 2013.

POWER PLANTS JOBS, disponível em: <www.powerplantsjobs.com>. Acesso em: Julho, 2013.

UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: <www.unfccc.int>. Acesso em: Março, 2013.

VELÁSQUEZ, Sílvia M. G., **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição a matriz energética do Brasil**. São Paulo-SP. 2000. 187 f. Dissertação (Mestre em energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SILVA, Wilson D.. **A cogeração de energia elétrica a partir da biomassa inserida na matriz energética brasileira**. 2009. 48 f. Projeto (Grau de engenheiro eletricista) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

SOLFUS ENGENHARIA E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA LTDA. **Análise de Fatura e Projeção do Consumo**. Curitiba, 2013.

TUMA INSTALAÇÕES, Disponível em: <www.empresastuma.com.br>. Acesso em Agosto, 2013.