

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR/MG
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
LUIZ FERNANDO DOS SANTOS

**ANÁLISE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO
DE ENERGIA POR BIOMASSA: UM ESTUDO DE CASO DE UMA FÁBRICA DE
CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO SITUADA NO CENTRO-OESTE DE
MINAS GERAIS**

FORMIGA – MG
2011

LUIZ FERNANDO DOS SANTOS

ANÁLISE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO
DE ENERGIA POR BIOMASSA: UM ESTUDO DE CASO DE UMA FÁBRICA DE
CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO SITUADA NO CENTRO-OESTE DE
MINAS GERAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Produção do UNIFOR-MG,
como requisito para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Produção.
Orientador: Prof^o. Marcelo Carvalho Ramos.

FORMIGA – MG

2011

Luiz Fernando dos Santos

ANÁLISE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO
DE ENERGIA POR BIOMASSA: UM ESTUDO DE CASO DE UMA FÁBRICA DE
CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO SITUADA NO CENTRO-OESTE DE
MINAS GERAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Produção do UNIFOR-MG,
como requisito para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Produção.
Orientador: Prof^o. Marcelo Carvalho Ramos.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Carvalho Ramos
Orientador

Examinador(a)

Formiga (MG), Junho de 2011.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela realização de um sonho, por me guiar e abençoar a minha vida e toda a minha família sempre. Pela força para superar todas as dificuldades, obrigado senhor.

De forma especial, a minha família, meus pais, pelo exemplo, amor, dedicação e apoio incondicional. A Alais, pelo amor, compreensão e ajuda.

A todos meus amigos, pela compreensão nos momentos de ausência para dedicação nos meus estudos e por sempre acreditarem em mim.

Aos professores da UNIFOR-MG, em especial Marcelo e Jussara, pelos conselhos e ajuda no desenvolvimento e enriquecimento deste trabalho, pelo aprendizado.

A todos os colegas e amigos do UNIFOR-MG, pela amizade, pelos momentos de descontração e de trabalho. É com grande alegria e saudade que guardarei o tempo que passamos juntos.

A todos vocês, muito obrigado.

Dedico este trabalho aqueles que me incentivaram e apoiaram em todos os momentos, que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

“Não tentes ser bem sucedido;
tenta antes ser um homem de valor.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Há menos de 50 anos, mais de 50% da energia consumida no Brasil e grande parte do mundo provinha da madeira. O uso da lenha era considerado até recentemente um indício de atraso econômico, tecnológico, e até quanto ao nível de civilização. E esta concepção está prestes a uma revolução conceitual. Em primeiro lugar, o aproveitamento da biomassa é associado a estágios mais elevados de produção, envolvendo técnicas sofisticadas. Em segundo, a crescente conscientização de que o uso de combustíveis fósseis aliado ao aumento da temperatura média do planeta devido ao efeito estufa, provocará a médio, ou até curto prazo, perturbações climáticas catastróficas. Portanto, há de se esperar que sejam recuperadas e revisadas tecnologias desenvolvidas anteriormente, e ainda sejam propostas inovações tecnológicas para o aproveitamento da biomassa na produção de energéticos. Este trabalho concentra-se no estudo dos processos de cogeração e em uma pesquisa da viabilidade econômica da implantação de um sistema de cogeração de energia por biomassa de lenha de eucalipto, visando a eficiência e surgimento de novas soluções energéticas.

Palavras-chave: Biomassa, Inovações Tecnológicas, Cogeração de Energia, Lenha de Eucalipto.

ABSTRACT

Less than fifth years, over 50% of energy consumed in Brazil and much of the world came from the wood. The use of firewood was until recently considered a sign of economic backwardness, technological, and the level of civilization. And this concept is about a conceptual revolution. Firstly, the use of biomass is associates with higher stages of production, involving sophisticated techniques. Second, the growing awareness that the use of fossil fuels coupled with the increase in average temperature of the planet from global warming, will cause in medium, or even short-term, catastrophic climate disruption. Therefore, there is expected to be retrieved and reviewed previously developed technologies, and innovations are still proposals for the utilization of biomass for energy. This work focuses on the study of cogeneration's process and on a survey of the economic feasibility of inserting a system for biomass cogeneration of energy of eucalyptus wood, with a view to efficiency and development of new energy solutions.

Keywords: Biomass, Technological Innovations, Cogeneration of Energy, Eucalyptus Wood.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Rotas de Conversão Energética da Biomassa.....	22
FIGURA 2 – Processo de Cogeração sob regime de Turbina de Contrapressão.....	24
FIGURA 3 - Processo de Cogeração utilizando turbina de Extração-Condensação.	25
FIGURA 4 – Turbina a gás.....	26
FIGURA 5 – Turbina a gás com Injeção de vapor.....	27
FIGURA 6 – Sistema de Cogeração com Ciclo Combinado.....	28
FIGURA 7 – Caldeira em fornalha CCZ.....	36
FIGURA 8 – Caldeiras de tubo de aço com fornalha para a queima de madeira.....	37
FIGURA 9 – Mapa do Processo de Fabricação de PCC.....	45
FIGURA 10 – Caldeira a Biomassa.....	47
GRÁFICO 1 – Aproveitamento de vapor no processo de Cogeração.....	50
GRÁFICO 2 – Custos dos Sistema de Cogeração.....	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Poder calorífico superior da biomassa (base seca).....	33
TABELA 2 – Características de algumas espécies de Eucalipto à idade de 10,5 anos, plantados em espaçamento de 3,0 x 2,0 m.....	34
TABELA 3 – Resultados da avaliação de uma caldeira de leito fluidizado circulante para resíduos de madeira da Babcock Ultrapower.....	36
TABELA 4 – Caracterização das caldeiras.....	47
TABELA 5 – Indicadores básicos de pequenas centrais termelétricas a biomassa..	49
TABELA 6 – Consumo de lenha para geração de energia.....	49
TABELA 7 – Valor da capacidade total de geração de energia anual.....	51
TABELA 8 – Valor da capacidade de excedentes de energia anual.....	51
TABELA 9 – Comparativo da situação atual x Cogeração de energia.....	52
TABELA 10 – Lucratividade do processo de Cogeração de energia.....	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Problema.....	14
1.2. Justificativa.....	14
1.3. Hipótese	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1. A situação do setor elétrico.....	17
3.2. Sistemas de Cogeração.....	18
3.3. Classificação dos processos de Cogeração.....	21
3.3.1. Cogeração baseada em ciclos a vapor.....	23
3.3.1.2. Cogeração a partir de turbinas a gás.....	26
3.3.1.3. Cogeração a partir de Turbinas a Gás com Injeção de Vapor.....	27
3.3.1.4. Ciclos combinados.....	28
3.3.2. Gaseificação e motores de combustão interna.....	29
3.3.3. Pirólise e motores de combustão interna.....	29
3.4. Principais Combustíveis Utilizados na Cogeração.....	30
3.4.1. Bagaço de cana.....	30
3.4.2. Carvão Mineral.....	31
3.4.3. Madeira.....	32
3.5. Avaliação de caldeiras para lenha e outras biomassas.....	35
3.6. Avaliação dos Sistemas de Cogeração.....	37
3.6.1 Eficiência.....	38
3.6.2. Balanço térmico.....	38
3.6.3. Leis da Termodinâmica.....	39
3.7. Crescimento Econômico e Consumo de Energia no Brasil.....	40
3.7.1. Eficiência na Indústria.....	41
3.8. Impactos Ambientais do Uso Energético da Biomassa.....	42
4. METODOLOGIA.....	43
4.1. Tipos de Pesquisa.....	43
4.2. Objeto de Estudo.....	43

4.3. Instrumento de coleta de dados.....	44
4.4. Análise e Interpretação de dados.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1. A indústria estudada.....	45
5.2. Caldeiras utilizadas e a capacidade de geração de vapor.....	46
5.3. Ciclos.....	48
5.4. Consumo médio de energia elétrica e madeira.....	48
5.5. Capacidade de Geração de energia elétrica.....	49
5.6. Viabilidade do Investimento.....	51
6. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

No atual mundo capitalista e globalizado em que se vive, a disponibilidade de combustíveis e a busca por novas fontes de energia se tornaram obsessão das principais potências mundiais para obterem a auto-suficiência e domínio do mercado global. Nesse cenário, nem todos os países dispõem de grandes reservas de combustíveis fósseis, como o petróleo e grande parte dos minerais. Surgiu então a necessidade de investimentos em tecnologia para o descobrimento de novas formas de energia, que não exponham o meio ambiente a tamanha degradação, como a Bioenergia.

No entanto, a bioeletricidade representa ainda, apenas 3% da matriz energética brasileira. A meta, graças ao setor sucroalcooleiro, considerando o potencial de mercado, é atingir a fatia de 11% até a safra 2015/2016, o que equivale à produção de uma usina como a Itaipu, e continuar crescendo para alcançar a meta de 14% até a safra 2020/2021 (REVISTA ANÁLISE, 2010).

A Cogeração é um tipo de Bioenergia que utiliza um método de conservação de energia em que, são produzidos energia mecânica (eletricidade) e calor útil (vapor) a partir de um único combustível.

Sendo o consumo de energia elétrica essencial para o funcionamento das indústrias e grande responsável pelo preço final do produto, mediante os altos custos contabilizados para seu consumo, a Cogeração surge como um diferencial e ganho em competitividade, reduzindo custos e o consumo de combustíveis poluentes do ar para indústrias que, assim como boa parte das fábricas produtoras de carbonato de cálcio precipitado, utilizam madeira de Eucalipto como combustível para queima nas caldeiras na produção de vapor necessário no processo.

Assim, é cada vez mais necessário desenvolver pesquisas para verificar a viabilidade econômica da implantação de um sistema de cogeração, pois se investe muito em tecnologia, equipamentos e processos mais eficientes, mas pode se obter alternativas viáveis e interessantes na obtenção da auto-suficiência na questão energética.

1.1. Problema

É viável a implantação de um sistema de cogeração de energia por biomassa numa fábrica de carbonato de cálcio precipitado?

1.2. Justificativa

Diante de uma revolução energética, o aproveitamento da biomassa está associado a estágios mais elevados de produção, envolvendo modernas técnicas agrícolas e o processamento físico e químico dos insumos. Comparada às opções energéticas de origem fóssil, a biomassa possui um ciclo extremamente curto, e a fotossíntese - processo produtivo da biomassa - capta em geral quantidades superiores àquelas dos gases emitidos na queima para formação de matéria-prima. Aliado a este conceito, existe uma crescente conscientização de que o uso dos combustíveis fósseis provoca o aumento da temperatura média do planeta, devido o efeito estufa, e que poderão ocorrer grandes catástrofes climáticas.

Uma das grandes vantagens da biomassa é a variedade de formas para sua utilização. Pode-se usar biomassa como combustível na forma de gases, líquidos ou sólidos. Por essa versatilidade, pode-se escolher o material que seja mais adequado ao solo, ao clima, e às necessidades sócio-econômicas.

O Brasil possui características especialmente adequadas à produção de biomassa para fins energéticos: clima tropical úmido, terras disponíveis, mão-de-obra abundante e carente de oportunidade de trabalho, e nível industrial tecnológico compatível.

É devido a esse cenário preocupante e rico em oportunidades de geração de energia, que se propõe recuperar e remodelar tecnologias utilizadas e ainda propor inovações tecnológicas significativas para aproveitar a biomassa na produção de energia elétrica. Neste contexto, é de grande importância o surgimento de trabalhos inovadores em setores ainda considerados “pouco explorados”, como em indústrias de fabricação de carbonato de cálcio precipitado, que utilizam a lenha de Eucalipto para queima na produção do gás e o vapor necessários no processo. Este vapor também pode ser aproveitado na geração de energia elétrica, através de um sistema

de cogeração, tornando a fábrica auto-suficiente na questão energética, e ainda, de acordo com a produção e o consumo de madeira, dando a possibilidade de comercializar o excedente de energia produzida, aumentando os lucros e viabilizando o investimento.

1.3. Hipótese

No cenário atual, a busca por alternativas viáveis econômica e ecologicamente corretas, são vistas pelo mercado globalizado e pela maioria das empresas como uma estratégia financeira e de marketing na procura pela redução dos custos e emissão de poluentes na atmosfera.

A implantação e aprofundamento deste trabalho poderá otimizar o processo de fabricação atual e, reduzir ou eliminar os custos referentes ao consumo de energia elétrica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar a viabilidade econômica da implantação de um sistema de cogeração de energia por biomassa em uma fábrica de carbonato de cálcio precipitado situada no centro-oeste de Minas Gerais.

2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o propósito definido no objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever, por meio dos principais autores e pesquisadores do assunto, o processo de cogeração de energia;
- Analisar o processo de produção atual e o uso da lenha de Eucalipto utilizado na queima como combustível, pela empresa, para definir o sistema de cogeração de energia mais eficiente;
- Fazer análise do consumo energético e da eficiência energética do sistema de cogeração por biomassa de lenha de Eucalipto no processo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Partindo da necessidade de criação de novos sistemas de produção de energia e biocombustíveis, segue os aspectos gerais da cogeração de energia, a situação atual do setor elétrico, as tecnologias recentemente utilizadas, as perspectivas e as previsões da cogeração a partir da biomassa.

3.1. A situação do setor elétrico

De acordo com a Comissão Especial Mista (2002) destinada a estudar as causas da crise de abastecimento de energia no país, bem como propor alternativas ao seu equacionamento no campo da energia, o Brasil consome anualmente cerca de 231,1 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, segundo o Balanço Energético Nacional, elaborado em 1999. A indústria de energia responde pelo abastecimento de 76% do consumo nacional e os 24% restantes são importados – principalmente petróleo, gás natural, carvão mineral e energia elétrica em quantidade menor. Mais da metade dessa energia é renovável. Do consumo total em 1999, 39% originaram-se de fonte hidráulica e 18% de biomassa. Os 44% restantes vieram de fontes fósseis ou não-renováveis

Para Goldemberg e Lucon (2008), as tecnologias renováveis não-hídricas devem crescer mais rapidamente, ainda que de um patamar inicial muito baixo. Cerca de 14 milhões de hectares de terra eram utilizados para biocombustíveis em 2006, ou 1% da terra agricultável do mundo; o cenário de referência prevê um aumento para 2% e o alternativo para 3,5%. Os benefícios dessa mudança são obtidos a custos inferiores que os da energia no cenário de referência e a demanda de energia total em 2030 é 10% inferior. Já em 2015, a diferença entre os cenários de referência e alternativo é de 4%.

Ainda segundo previsões de Goldemberg e Lucon (2008), em 2030, políticas que encorajam a conservação seriam responsáveis por 80% das mitigações de emissões e o resto viria da troca de combustíveis. A eficiência nos combustíveis responderia por 36% das mitigações e a eficiência final no uso elétrico por mais 30%. A eficiência na geração de eletricidade contaria com 13%, os renováveis e biocombustíveis com 12% e nuclear com 10%.

Num cenário futuro, as estratégias de nicho poderão ser utilizadas por produtores independentes de energia, interessados em vender eletricidade e vapor do processo de uma maneira vantajosa para clientes que utilizem esses dois insumos. Poderiam ser utilizados processos de cogeração utilizando ciclos térmicos de alta eficiência, que teriam a vantagem de criar estratégias de customização, por exemplo, nas quais produtores independentes instalariam uma planta térmica anexa às instalações do cliente, para produzir vapor e eletricidade da maneira desejada. Geradoras, distribuidoras e varejistas também poderiam customizar os tipos de contrato, incluindo preço, qualidade, prazo de pagamento e outros aspectos referentes aos grandes clientes (CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 2009).

Utilizando essa estratégia, uma planta geradora térmica poderia ofertar eletricidade numa certa região ao menor custo, embora não fosse a planta mais econômica, devido ao fato de que somados os custos de transporte, nenhum outro produtor poderia oferecer menores preços naquela região.

Nesse contexto, a auto-suficiência de cogeradores (mesmo não ocorrendo a venda de excedentes de eletricidade), seria uma opção interessante para contribuir na oferta de energia, principalmente no período seco e horários de pico, evitando a construção de novas unidades de geração.

3.2. Sistemas de Cogeração

Os primeiros sistemas de cogeração instalados ao redor do mundo datam da primeira década do século XX. Nessa época, era muito rara a produção centralizada de energia elétrica, pois ainda não existiam as grandes centrais geradoras pela inexistência de uma tecnologia eficiente. O próprio consumidor de energia elétrica instalava sua própria central de geração de energia, e esta situação perdurou até a década de 40 (NOGUEIRA E WALTER, 2008).

Devido ao avanço da tecnologia, novos conceitos de geração e de interligação de sistemas elétricos, acompanhado das grandes centrais (hidrelétricas e termelétricas – nucleares, carvão, gás natural e óleo combustível), conseguiram fornecer energia abundante e de baixo custo, e com isso, os sistemas de cogeração perderam espaço.

No entanto, nas últimas décadas, com o aumento sustentado da demanda de energia elétrica, complementado com as exigências crescentes do mercado por melhoria da qualidade do fornecimento para corresponder com o avanço da “robotização da economia” e da evolução tecnológica, os grandes sistemas centralizados de geração de energia passaram a ser exigidos em novas condições de operação e começaram a dar “sinais de vulnerabilidade”, promovendo decisões em favor da criação de oportunidade para o avanço dos “sistemas de geração distribuída”, através dos quais, os clientes finais (indústria, comércio e serviços), utilizam fontes de energia primária disponíveis (biomassa e/ou gás natural) (COGEN, 2010).

A cogeração é um método de conservação de energia em que, são produzidos a partir de um único combustível, energia mecânica (eletricidade) e calor útil (vapor). Embora existam diferentes definições de cogeração, é importante esclarecer a diferença entre auto-produtor, aquele que produz energia (térmica, hidráulica, etc.) e cogeador, aquele que também produz energia, porém, com a necessidade de produzir vapor e eletricidade (VELÁZQUEZ, 2000).

Para Horlock (1997), um dos aspectos importantes quanto à definição do termo cogeração, é a relação com a funcionalidade da tecnologia. Os sistemas de cogeração precisam ser projetados para satisfazer a demanda térmica do consumidor e não se torna viável adquirir este tipo de energia de empresas externas. Tem como principais objetivos a potência total produzida (potência elétrica), atendendo as necessidades da planta industrial pela qual está instalado o sistema, podendo existir também a possibilidade de venda da produção excedente de energia elétrica, o que viabiliza o investimento e se considera mais um produto de comercialização da empresa.

Um sistema de cogeração é constituído por um conjunto de equipamentos como turbinas, geradores, caldeiras, trocadores de calor, que interligados, compõem um processo de geração de energia mais eficiente do que a geração de energia elétrica, pois a cogeração produz dois produtos. Como consequência da maior eficiência, tem-se a menor emissão de poluentes, utilizando-se o mesmo combustível (VELÁZQUEZ, 2000).

Segundo Nogueira e Walter (2008), o interesse relativo à cogeração de energia a partir de biomassa pode ser atribuído a um conjunto de fatores, entre os quais devem ser destacados os seguintes:

- (i) Desde que a produção de biomassa seja sustentável, as emissões de gases de efeito estufa são muito baixas ou mesmo nulas, conferindo clara vantagem em relação ao uso de combustíveis fósseis;
- (ii) Quanto aos demais aspectos ambientais, considerando a etapa de conversão, a geração de eletricidade a partir da biomassa pode trazer vantagens em relação ao uso de combustíveis quanto às emissões de óxidos de enxofre e, em geral, também quanto às emissões de óxidos de nitrogênio;
- (iii) Possibilita a geração de empregos, sobretudo na etapa de produção, ajudando a minimizar o êxodo rural;
- (iv) Permite a manutenção da atividade agrícola, o uso adequado da terra e a minimização das despesas com subsídios;
- (v) Diversifica a matriz de geração de eletricidade, reduzindo riscos de desabastecimento e de drástica elevação dos custos da geração.

As tendências e os incentivos de capitais privados se definem como resposta de políticas de racionalização das fontes de energia na maioria dos países da América Latina e do mundo, devido o grande aumento da demanda. Com isso, vem se despertando o interesse de vários empresários de diversos setores industriais quanto ao processo de cogeração de energia (VIEIRA e OLIVEIRA JR., 1998).

Entretanto, para Nogueira e Walter (2008), apesar das vantagens, e independentemente da biomassa empregada como insumo, conferem desvantagens para seu uso:

- (i) Os custos de produção da biomassa, e em alguns casos, também os custos de transporte;
- (ii) Consideradas as tecnologias ora comerciais, a reduzida eficiência de conversão energética da biomassa em eletricidade e a baixa capacidade unitária dos sistemas prejudicam sua viabilidade econômica;
- (iii) É preciso que os benefícios ambientais sejam assegurados em toda cadeia de produção biomassa-eletricidade, uma vez que a questão ambiental é uma de suas principais justificativas.

Nos EUA, existem aproximadamente mil termelétricas a biomassa de pequeno porte, e a maior delas tem 75 MW de capacidade. Já na Europa, a produção de eletricidade e de calor a partir da biomassa cresceu de forma lenta, mas contínua, nos últimos anos, principalmente em função das políticas adotadas na Áustria, Alemanha, Finlândia e Reino Unido (NOGUEIRA e WALTER, 2008).

3.3. Classificação dos Processos de Cogeração

Nas tecnologias que operam segundo o ciclo “topping”, os gases de combustão se encontram a uma temperatura mais elevada e são utilizados para geração de eletricidade ou energia mecânica. O calor rejeitado pelo sistema de geração de potência é utilizado para atender os requisitos de energia térmica do processo. Assim, esta modalidade de cogeração produz energia elétrica ou mecânica para depois recuperar calor, que é fornecido geralmente na forma de vapor no processo (VELÁZQUEZ, 2000).

Nos ciclos “bottoming”, a energia térmica gerada precisa de altas temperaturas. Estes processos são voltados para o setor de indústrias químicas, pois a energia gerada em altas temperaturas favorece muito. Porém, essa energia térmica possui contaminação de agentes corrosivos, o que eleva os custos das caldeiras de recuperação da instalação do sistema (LIZARRAGA, 1994).

Por isso, apenas os ciclos “topping” apresentam real economia na energia primária, pois a maioria das aplicações dos processos requer vapor de baixa pressão, que é convenientemente produzido neste ciclo.

A FIG 1 apresenta as diversas rotas de conversão tecnológica da biomassa, tendo como produtos finais calor, eletricidade e combustíveis para sistemas de transporte.

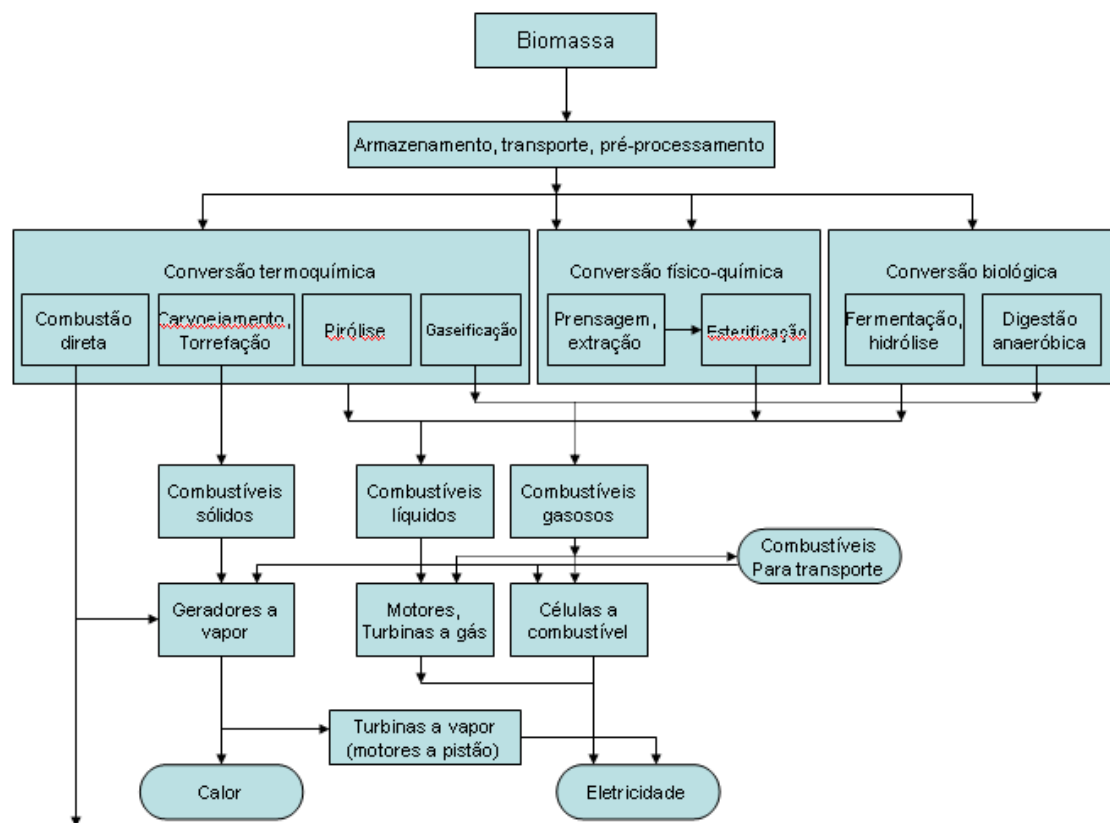


Figura 1 – Rotas de conversão energética da biomassa

Fonte: Nogueira e Walter (2008).

A produção de eletricidade a partir da biomassa inclui a combustão direta da biomassa, ou sua conversão em combustíveis sólidos, líquidos, ou gasosos. Enquanto a biomassa é insumo primário, seus processos de conversão são classificados em termoquímicos, físico-químicos ou biológicos. Do ponto de vista das tecnologias de produção de eletricidade, as rotas tecnológicas possíveis incluem os sistemas baseados nos ciclos a vapor (que usualmente empregam combustíveis sólidos), os sistemas baseados em motores de combustão interna (ou mesmo de combustão externa) e em turbinas a gás (alternativa que requer combustíveis líquidos e gasosos, com determinadas especificações físico-químicas) e os sistemas baseados em células a combustível (NOGUEIRA e WALTER, 2008).

3.3.1. Cogeração baseada em ciclos a vapor

De acordo com Nogueira e Walter (2008), o vapor gerado a pressão e temperatura definidas em projeto, são direcionados à expansão em turbinas a vapor, que acionam geradores elétricos. O vapor deve ser expandido a menor pressão possível para ocorrer a condensação na produção exclusiva de eletricidade. Na cogeração, ao menos uma fração do vapor, ou todo ele, deve ser extraída a pressão necessária para atender a demanda de calor.

A produção de eletricidade num ciclo a vapor, de uma forma geral, é feita através de um ciclo de Rankine tradicional com turbina a vapor, o que corresponde a uma tecnologia em uso comercialmente há mais de 100 anos. No caso de geração somente de energia elétrica, usa-se uma turbina de condensação: o vapor na saída da turbina vai para o condensador onde é totalmente condensado para retornar à caldeira. Para produção simultânea de eletricidade e vapor, pode-se usar a turbina de contrapressão, a mais usada atualmente no Brasil, ou uma turbina de condensação e extração. Neste processo, parte do vapor é extraído da turbina numa pressão intermediária, indo para o processo; o restante expande na turbina até a pressão do condensador, condensa e retorna à caldeira juntamente com o condensado do processo (COELHO, 1992).

Os sistemas baseados em ciclos a vapor têm eficiência energética relativamente baixa e a baixa capacidade de geração. Esta baixa eficiência deve-se indiretamente às características da biomassa – alta umidade, baixa densidade e baixo poder calorífico. Outra alternativa de cogeração a partir da biomassa corresponde aos chamados sistemas co-firing, nos quais a biomassa é queimada misturada com combustíveis fósseis em termelétricas já existentes, em geral a carvão mineral (NOGUEIRA e WALTER, 2008).

Segue o fluxograma do processo de cogeração com turbina de contrapressão, modelo que consiste em produção para o próprio consumo e venda do excedente de energia, conforme FIG 2.

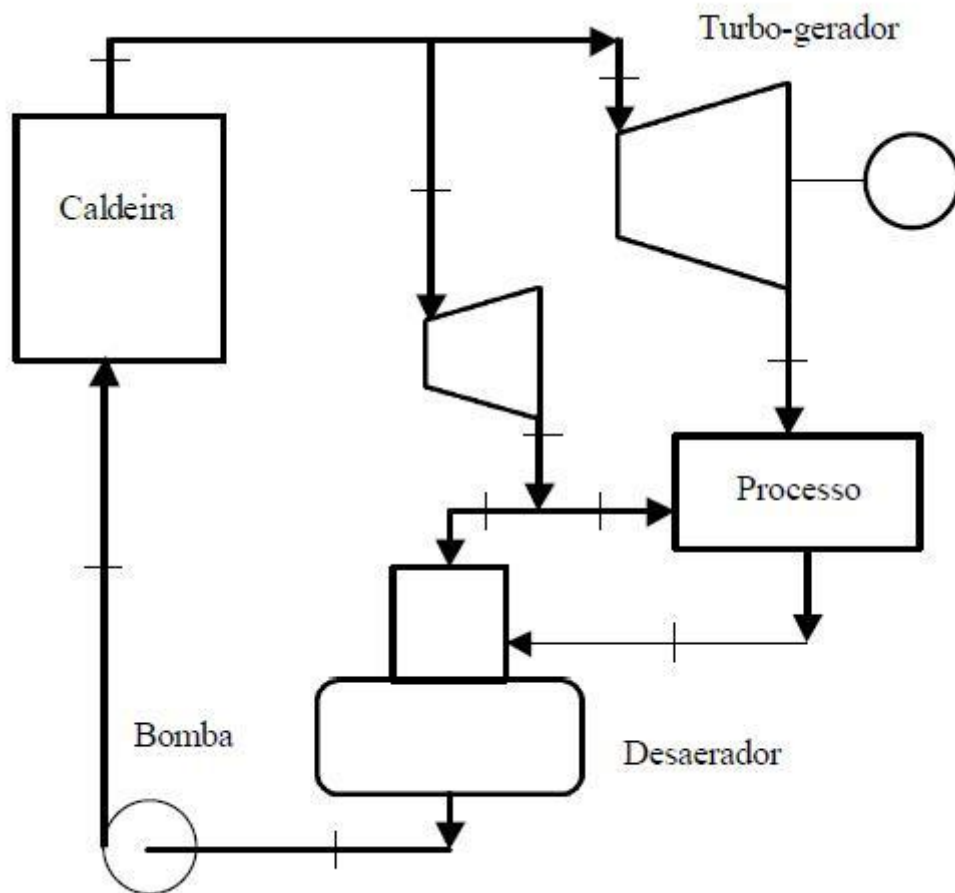


Figura 2 – Processo de Cogeração sob regime de Turbina de Contrapressão

Fonte: TGM Turbinas (2010)

Entretanto, existem plantas que necessitam de variados níveis de pressão de vapor, o que se faz necessário estabilizar o fornecimento de excedentes de energia elétrica as concessionárias. A fim de solucionar este problema é necessária a combinação de turbinas a vapor de contrapressão e turbinas de condensação, que permitirão melhores condições de energia elétrica e calor para o processo. A implantação da turbina de condensação com extração se faz necessário devido à capacidade de gerar maior relação de energia térmica e energia elétrica, o que varia de acordo com a planta. Torna-se muito significativo a energia gerada no condensador, sendo maior a capacidade de produção de energia elétrica. Normalmente estes sistemas possuem turbinas de extração dupla, onde a primeira pressão de vapor é produzida pelas turbinas de acionamento mecânico, e a segunda

extração do vapor é feita de acordo com a necessidade de pressão a ser utilizada no processo (LOZANO, 1998).

Abaixo, segue o fluxograma do sistema Extração-Condensação, utilizado para gerar maior relação de energia térmica e elétrica, variando de acordo com a necessidade de consumo, de acordo com FIG 3.

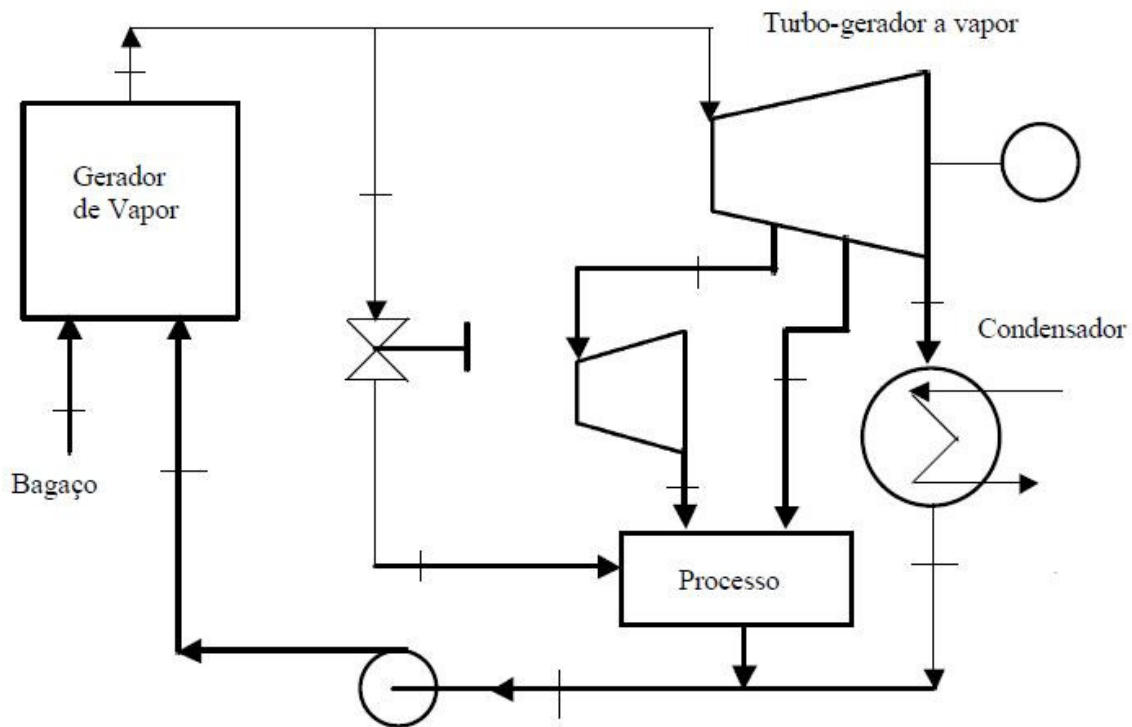


Figura 3 – Processo de Cogeração utilizando turbina de Extração-Condensação

Fonte: TGM (2010).

O processo com turbina a vapor utilizando turbina de Extração-Condensação apresenta os melhores rendimentos de produção de energia elétrica. Em geral, os sistemas de cogeração por meio de turbinas apresentam grande necessidade de disponibilidade de equipamentos para atender a demanda de energia térmica e elétrica.

3.3.1.2. Cogeração a partir de turbinas a gás

A evolução da tecnologia proporcionou maior contribuição na eficiência das turbinas a gás proveniente também da disponibilidade crescente de gás natural com preços mais acessíveis, o que tem favorecido muito a implantação de sistemas de cogeração a partir de turbinas a gás. As turbinas a gás são equipamentos utilizados para aplicação aeronáutica e no setor industrial (BARROS, 1998).

As turbinas a gás diferem das turbinas a vapor tradicionais pelo fato de utilizarem os gases provenientes da câmara de combustão conforme o esquema da FIG 4.

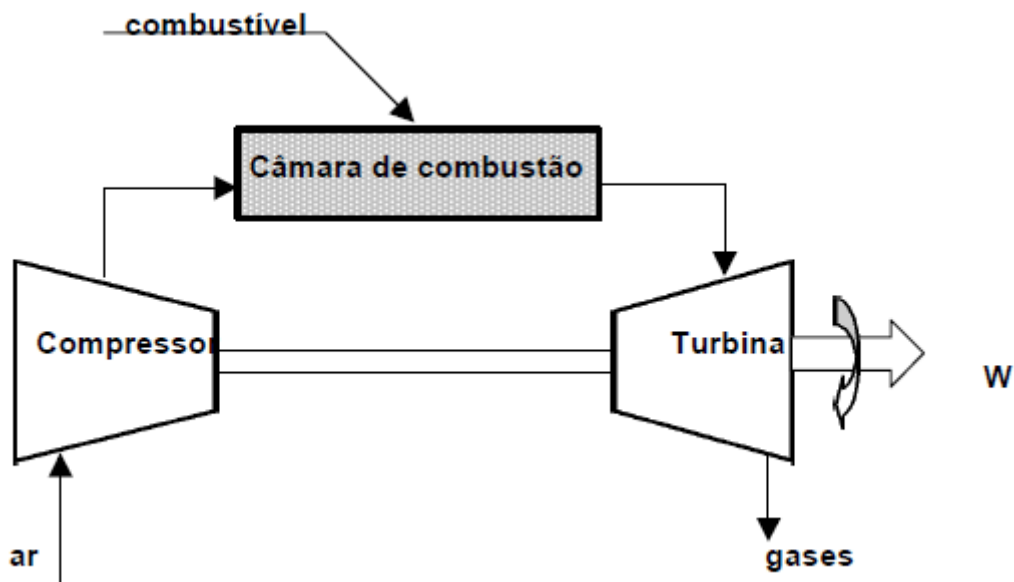


Figura 4 – Turbina a gás

Fonte: VAN WYLEN et al., 1998.

Segundo Velazquez (2000), a turbina a gás é uma máquina térmica, onde a energia química da combustão é transformada em trabalho mecânico útil através do eixo da turbina. Sua classificação básica é feita em relação ao ciclo termodinâmico, onde se pode ter: ciclo aberto ou ciclo fechado.

3.3.1.3. Cogeração a partir de Turbinas a Gás com Injeção de Vapor

Este ciclo com injeção de vapor representa uma outra alternativa para a utilização de turbinas a gás, onde parte do vapor produzido na caldeira de recuperação, a partir dos gases de exaustão, é injetado na câmara de combustão da turbina a gás.

Para Guarinello (1997), são recuperados em uma caldeira de recuperação, todos os gases de saída da turbina, onde também se produz vapor a ser utilizado no processo produtivo e parte deste vapor é injetado na câmara de combustão da turbina, conforme FIG 5.

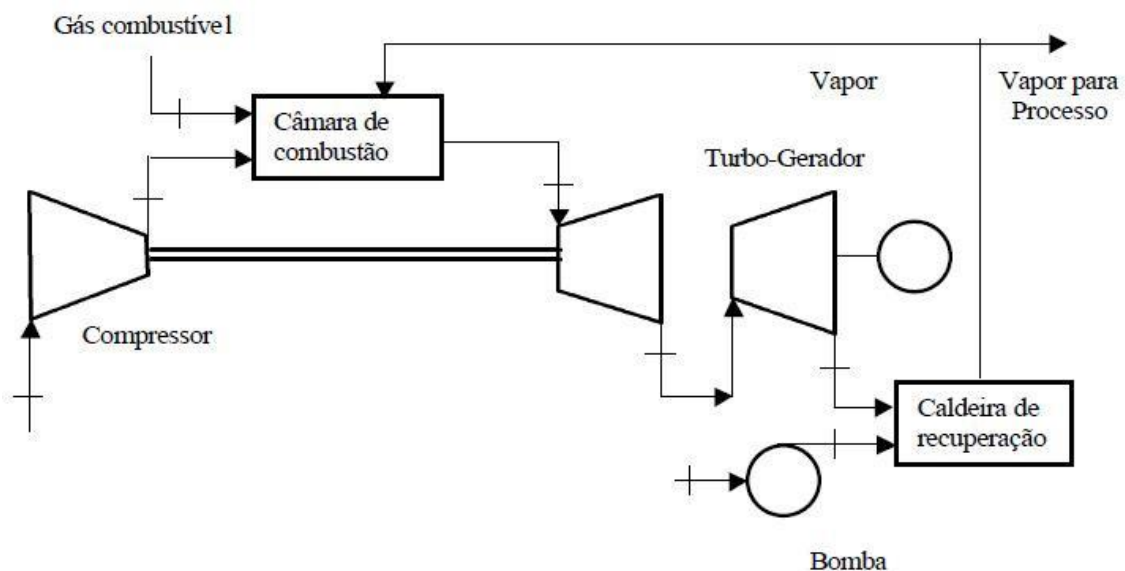


Figura 5 – Turbina a Gás com Injeção de Vapor

Fonte: TGM Turbinas (2010)

Devido o descarte da água junto à exaustão dos gases Este ciclo possui a desvantagem da necessidade de implantação de uma planta de tratamento de água para suprir o fornecimento de água tratada, aumentando os custos (BATHIE, 1996).

3.3.1.4. Ciclos combinados

Para Nogueira e Walter (2008), entre as tecnologias termelétricas, a dos ciclos combinados é a de maior rendimento. Para que essa tecnologia possa ser empregada com combustíveis sólidos, propõe-se a prévia gaseificação do combustível e a queima do gás resultante nas turbinas a gás. Os sistemas baseados na gaseificação de carvão mineral e de óleos muito viscosos são chamados IG-CC (Integrated Gasification to Combined Cycles), e em todo o mundo existem cerca de 20 plantas em operação. A versão em que se emprega biomassa é conhecida pela sigla BIG-CC (Biomass Integrated Gasification to Combined Cycles) e apenas uma instalação foi construída e operou por um período razoável.

Os projetos considerados nos últimos anos falharam pelo alto risco associado, em função dos altos custos e pela grande competitividade existente no setor elétrico, em todo o mundo. A viabilidade a médio-longo prazo da tecnologia BIG-CC depende de desenvolvimento tecnológico e de redução dos custos, tanto pelos efeitos de escala quanto pelo efeito de aprendizado.

Segue abaixo a FIG 6, demonstrando o fluxograma do ciclo combinado.

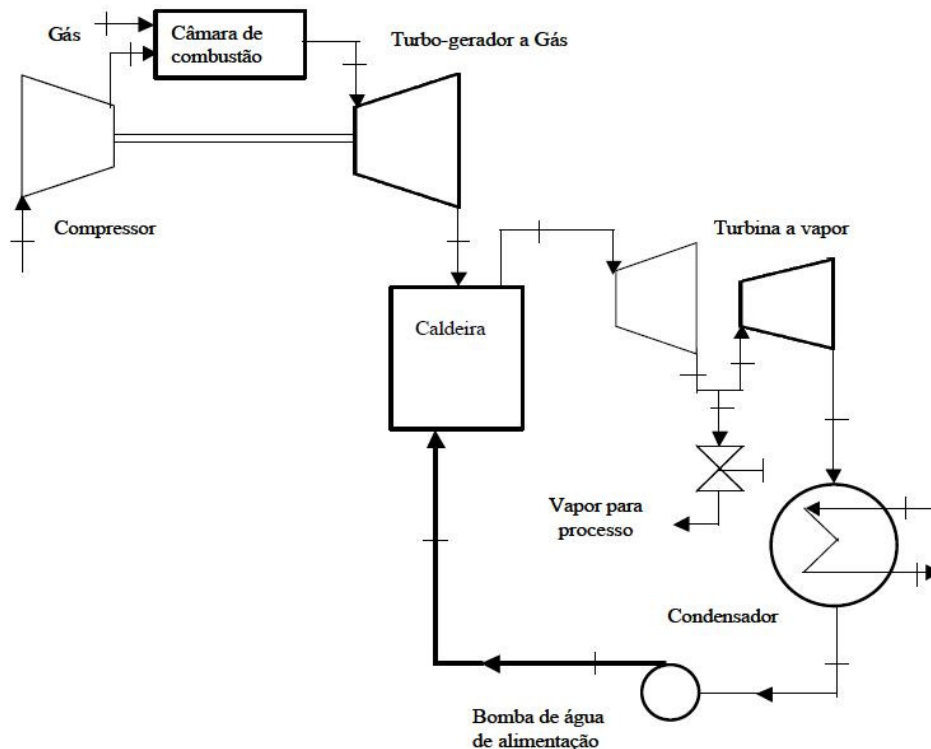


Figura 6 - Sistema de cogeração com ciclo combinado

Fonte: TGM Turbinas (2010)

O rendimento térmico do ciclo combinado é a relação entre a potência total líquida produzida – da turbina a gás e da turbina a vapor, descontados os consumos de energia nas bombas e compressor – e a energia disponível no combustível, alimentado na câmara de combustão da turbina a gás. Assim, para a mesma quantidade de combustível alimentada, a potência produzida no ciclo combinado é maior e, conseqüentemente, maior o seu rendimento (COELHO, 1992).

3.3.2. Gaseificação e motores de combustão interna

A produção de eletricidade por meio de gaseificadores de biomassa integrados a motores de combustão interna é uma tecnologia comercial para instalações de pequena capacidade (a maioria delas com capacidade inferior a 150 kWe). Uma grande limitação dessa alternativa é o processo de limpeza do gás (principalmente a remoção do alcatrão e de particulados muito finos), uma vez que a tecnologia ainda não foi totalmente desenvolvida e os custos são altos (NOGUEIRA e WALTER, 2008).

Para que a biomassa seja utilizada na alimentação da turbina a gás é necessário submetê-la a um processo de gaseificação ou liquefação e posterior limpeza dos gases, o que corresponde a um item muito importante do processo em questão (VELÁZQUEZ, 2000).

Há grande potencial para essa alternativa nos países em desenvolvimento, especialmente em áreas isoladas onde a conexão com a rede não é possível ou é cara.

3.3.3. Pirólise e motores de combustão interna

A produção de eletricidade a partir da pirólise da biomassa é uma das alternativas tecnológicas consideradas nos projetos de P & D, onde uma das vantagens potenciais é a desvinculação da produção de eletricidade com a produção de biomassa. O óleo resultante da pirólise transportado até as centrais elétricas e as limitações relativas ao tamanho da planta e as impactos ambientais poderiam ser superadas (NOGUEIRA e WALTER, 2008).

A pirólise rápida da biomassa é uma tecnologia nova, e que ainda não foi testada, portanto existem muitas dúvidas sobre essa alternativa, devido a problemas de contaminação com substâncias alcalinas.

3.4. Principais Combustíveis Utilizados na Cogeração

A biomassa pode ser obtida de vegetais lenhosos (madeira e seus resíduos), vegetais não-lenhosos e de resíduos orgânicos (resíduos agrícolas, urbanos e industriais). Também pode se obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais.

Na atualidade, a segunda principal fonte de energia no Brasil é proveniente da biomassa. Na utilização das energias renováveis, o país é um dos poucos no mundo com potencial para substituir as energias fósseis. As tecnologias utilizadas para geração de energia elétrica a partir da biomassa são: a combustão direta acoplada a um ciclo de vapor e a gaseificação (CORTEZ, LORA e AYARZA, 2008).

Para que essa expansão continue e melhore o uso da biomassa no Brasil, é preciso que, além do avanço tecnológico, sejam desenvolvidos modelos de gestão para garantir a sustentabilidade econômica, técnica e ambiental das fontes energéticas.

A seguir serão descritos as características, a representação e perspectiva na matriz energética, dos principais combustíveis utilizados na cogeração.

3.4.1. Bagaço de cana

O consumo de bagaço de cana cresceu 11,6% no setor sucroalcooleiro brasileiro, atingindo $97,3 \times 10^6$ toneladas. Esse aumento no consumo fez com que o Brasil dominasse tecnologias de projeto e fabricação, sendo atualmente capaz de produzir os componentes a custos internacionalmente competitivos (CORTEZ, LORA E AYARZA, 2008).

O uso de bagaço de cana entre 2000 e 2007, a principal matéria-prima da biomassa utilizada nas termelétricas, aumentou sua participação em 39%, ultrapassando insumos como o óleo diesel (REVISTA ANÁLISE, 2010).

A quantidade de bagaço obtida nas usinas é de aproximadamente 24% a 30% do peso inicial da cana de açúcar, o que equivale a 2,6 toneladas de bagaço por toneladas de açúcar, com umidade em torno de 48% (HUGOT, 1972).

Nos últimos anos, o corte mecanizado da cana tem ganhado cada vez mais espaço, incrementando-se o conteúdo de cinzas no bagaço devido a uma maior quantidade de terra e outros tipos de sujeira levados com a cana à usina.

O bagaço tende a ser misturado, pois quanto melhor a condição do preparo da cana e extração do caldo, resultam numa baixa umidade e baixo teor de sacarose, fatores que interferem diretamente na câmara de combustão da caldeira, devido à gaseificação e combinação com o oxigênio serem mais rápidos (FILHO-DEARBORN, Aspectos Relacionados à Eficiência em Caldeiras a Bagaço).

Outra característica importante do bagaço de cana é a composição granulométrica, a qual caracteriza a distribuição de partículas do bagaço com diferentes diâmetros médios, dependendo da variedade da cana, do esquema de preparação e moagem da usina (CORTEZ, LORA E GÓMEZ, 2008).

3.4.2. Carvão Mineral

Para Borba (2001), o carvão é maciçamente empregado em escala planetária na geração de energia e na produção de aço, sendo fundamental para a economia mundial. Na siderurgia é utilizado um carvão coqueificável, um carvão nobre, com propriedades aglomerantes. No ano de 2000, o mundo produziu 831 Mt (milhões de toneladas) de aço, que requerem 608 Mt de carvão, significando aproximadamente 17,5% da produção global de carvão mineral, que foi de 3.466 Mt. Na geração de energia, o carvão dispõe, a partir do linhito, toda gama possível de qualidade.

O carvão é um combustível fóssil formado a partir de substância orgânica. É uma rocha porosa que apresenta estrutura orgânica, inorgânica e física. A estrutura física se relaciona diretamente com a compressibilidade, difusividade, capacidade de extração e outros fatores (GORBATY, 1994).

Entre os recursos energéticos não-renováveis, o carvão ocupa a primeira colocação em abundância e perspectiva de vida útil, sendo a mais importante reserva energética mundial. Há ocorrência de reservas de carvão mineral em vários estados brasileiros, significativas, porém, apenas as camadas de carvão sub-

betuminoso e betuminoso do flanco leste da Bacia do Paraná (Formação Rio Bonito, do Permiano Médio), no sul-sudeste brasileiro. Em São Paulo há depósitos sem qualquer relevância econômica, de modo que serão consideradas como reservas somente as dos três estados do sul (BORBA, 2001).

As reservas de carvão que possuem grande potencial energético no Brasil estão situadas em maior parte na região sul do país, e também no Espírito Santo (FREITAS, CUNHA e EMMERICH, 1997).

A pressão ambientalista contra o carvão tem sido intensa, principalmente com as conseqüências do aquecimento global e da redução da camada de ozônio, dentro da reivindicação do controle e da redução das emissões de poluentes para a atmosfera. Apesar disso, a sua posição no cenário mundial vem se mantendo inabalável, devido sua importância.

3.4.3. Madeira

Historicamente, a biomassa florestal constitui em um importante insumo energético, principalmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento.

Segundo Couto e Muller (2008), em face das perspectivas de esgotamento das fontes energéticas não-renováveis, ressalta-se a necessidade de rever os conceitos sobre o processo de desenvolvimento econômico de forma que não comprometa o atendimento às necessidades das gerações futuras. Neste contexto, o uso da biomassa florestal como insumo para geração de energia reveste-se de notável importância na busca de alternativas energéticas, pois se trata de uma fonte renovável e descentralizada, que promove a geração de empregos e renda adicional.

Com base nos dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF) (2006), os principais consumidores de madeira são também os principais agentes reflorestadores no Brasil: empresas de papel e celulose (30%), empresas siderúrgicas (21%), indústria de madeira serrada (19%) e empresas de painéis de madeira reconstituída (10%).

Ainda segundo a ABRAF (2006), o setor florestal brasileiro tem realizado investimentos significativos, sendo que até 2012 devem ser investidos no setor cerca de US\$ 20 bilhões. No ano de 2005 somente as empresas associadas da ABRAF

investiram R\$ 1,3 bilhão. Desse total, 43% foram na reforma e expansão da base florestal das empresas.

Para Cortez, Lora e Gómez (2008), poder calorífico de qualquer material energético é definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível, sendo medida em kJ/kg. Esse valor quantitativo pode variar muito de acordo com o teor de umidade da biomassa. Define-se poder calorífico inferior (PCI) quando não se considera o calor latente de condensação da umidade dos produtos da combustão. A diferença entre poder calorífico superior (PCS) e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida na oxidação do hidrogênio do combustível.

O PCS das principais biomassas é apresentado na TAB 1 a seguir.

TABELA 1 - Poder calorífico superior da biomassa (base seca)

Tipo de Biomassa (PCS)	Poder calorífico superior (MJ/kg)
Pínus	20,02
Eucalipto	19,42
Casca de arroz	16,14
Bagaço de cana	17,33
Casca de coco	19,04
Sabugo de milho	18,77
Ramas de algodão	18,26
Resíduos sólidos urbanos	19,87
Excrementos de gado	17,36

Fonte: Jenkins (1990)

A madeira do gênero eucalyptus é a mais utilizada para a implantação de florestas com fins energéticos, em função de sua grande plasticidade ambiental, altos índices de produtividade e características energéticas (densidade da madeira e poder calorífico). As principais espécies de eucalipto utilizadas são: eucalyptus grandis, eucalyptus urophylla, eucalyptus urograndis (híbrido), eucalyptus camaldulensis, eucalyptus citriodora, eucalyptus cloeziana, eucalyptus globulus, eucalyptus maculata, eucalyptus paniculata, eucalyptus pellita, eucalyptus pilularis, eucalyptus saligna e eucalyptus tereticornis (COUTO e MULLER, 2008).

No Brasil, em 1940, 80% da energia consumida era proveniente da biomassa florestal e, em 1998, apenas 9%. No entanto, em termos quantitativos, o consumo não se alterou significativamente, mostrando que existe um amplo mercado para utilização da biomassa florestal como fonte de energia (LIMA e BAJAY, 2000).

Segundo Couto e Muller (2008), o setor florestal, conta atualmente, com aproximadamente 3 milhões de hectares de florestas plantadas com eucaliptos em todo o Brasil, sendo Minas Gerais o estado com maior área plantada (aproximadamente 1,6 milhões de hectares). A produtividade varia de uma região para a outra.

As características das espécies mais indicadas à idade de 10,5 anos para uso energético são apresentadas na TAB 2.

TABELA 2 - Características de algumas espécies de eucalipto à idade de 10,5 anos, plantados em espaçamento de 3,0 x 2,0 m.

Espécies	E. camaldulensis	E. citriodora	E. grandis	E. saligna	E. urophylla
Dens. Básica (g/cm ³)	0,687	0,73	0,479	0,548	0,564
Teor de lignina (%)	30,6	22,4	23,9	26,3	27,3
Rend. CV (%)	34,7	32,6	33,7	33,7	34,1
Teor de carbono fixo (%)	84,1	81,1	80,7	84,8	82,8
Teor de voláteis (%)	15,4	17,3	18,7	14,7	16,3
Teor de cinzas (%)	0,5	1,6	0,6	0,5	0,9
PCS do material (kcal/kg)	5.085	4.718	4.340	4.633	4.312
PCS do carvão (kcal/kg)	7.977	8.088	6.626	6.972	7.439

Fonte: Couto e Muller (2008).

A definição do espaçamento adequado para determinada espécie leva em consideração características como o crescimento da espécie, a qualidade do sítio, o uso final da madeira, os tratamentos silviculturais e os equipamentos utilizados na colheita (BERGER, 2000).

O manejo florestal visando à produção de biomassa para uso energético consiste na escolha do material genético adequado, no controle da densidade de plantio e da rotação dos plantios. Recomenda-se a utilização de espaçamentos mais adensados, tendo em vista que o objetivo é a produção do maior volume de

biomassa por unidade de área no menor espaço de tempo possível (COUTO e MULLER, 2008).

Pelo fato da biomassa florestal já ser utilizada como insumo no processo de produção de carbonato de cálcio precipitado pela maioria das fábricas, o aproveitamento, inclusive em termos ambientais, para cogeração de energia é uma excelente opção. Com as tecnologias atuais, podem se criar processos eficientes.

3.5. Avaliação de caldeiras para lenha e outras biomassas

De acordo com Lora e Zampieri (2008), a combustão de madeira e resíduos florestais em fornalhas de caldeiras já é uma prática bastante difundida. Geralmente, essas caldeiras são projetadas prevendo a possibilidade da queima de diferentes tipos de biomassa. Assim, podem-se observar nos variados catálogos de fabricantes a denominação de caldeiras para combustíveis lignocelulósicos, que inclui a lenha, o bagaço e variados resíduos agrícolas. Também podem ser encontrados projetos específicos para lenha.

Um exemplo de caldeira construída para este fim é a fornalha com zona de combustão controlada (Controlled Combustion Zone – CCZ) da Babcock and Wilcox. A caldeira tem capacidade de 230 t/h com madeira, podendo queimar também uma mistura carvão-madeira. Os parâmetros do vapor são $p = 10 \text{ MPa}$ e $t = 510 \text{ }^\circ \text{C}$. Em fornalhas convencionais para biomassa, é utilizada a reinjeção das cinzas à fim de reduzir as perdas com o carbono não queimado no arraste (q_4). Segundo o fabricante da fornalha CCZ, esse sistema permite valores da perda q_4 de 1% ou menos sem rejeição de cinzas e demonstrou a possibilidade de queimas combustíveis com até 65% de umidade sem necessidade de combustível auxiliar (LORA E ZAMPIERI, 2008).

Segue abaixo na FIG 7 o esquema das caldeiras em fornalha CCZ.

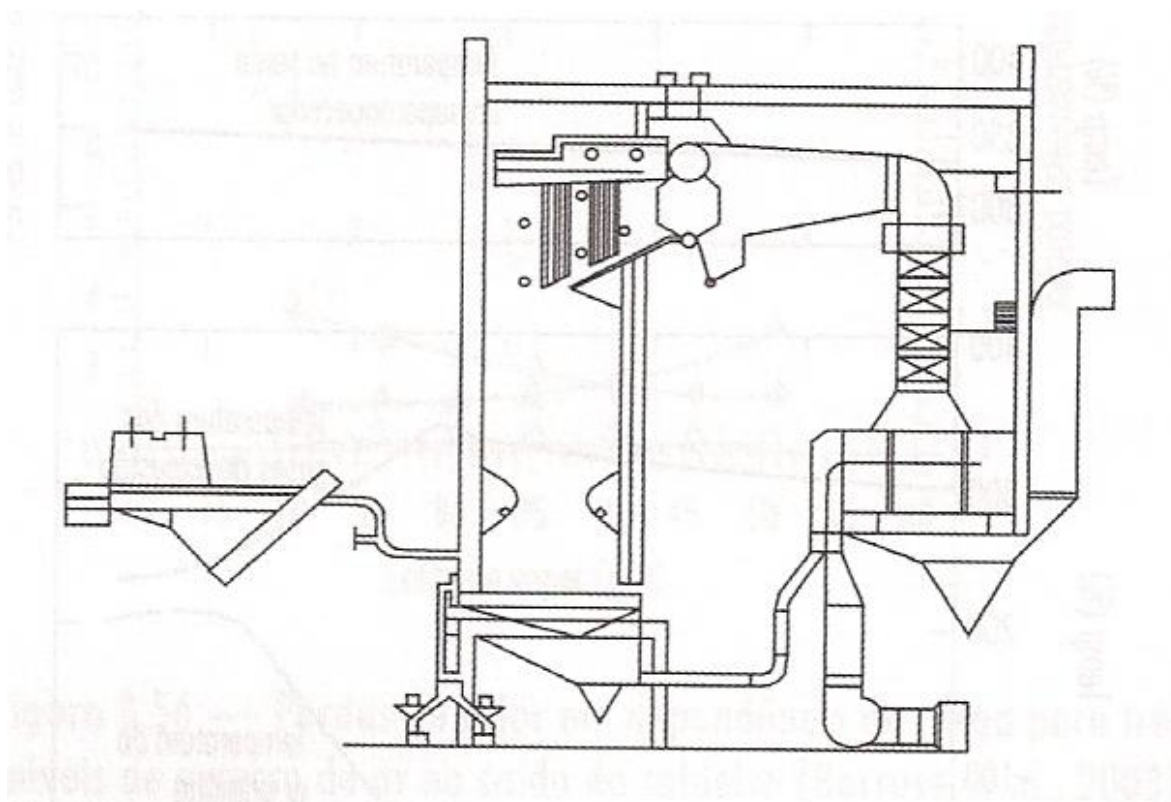


Figura 7 – Caldeira em fornalha CCZ

Fonte: Lora e Zampieri (2008)

Outra opção importante para a queima da madeira é a caldeira de leito fluidizado circulante. A Babcock and Wilcox e a firma sueca Studsvik Energiteknik AB desenvolveram um projeto com essa tecnologia (BELIN et al., 1988).

A seguir, a TAB 3 demonstra os resultados gerados pela avaliação de uma caldeira de leito fluidizado utilizando-se resíduos de madeira.

TABELA 3 – Resultados da avaliação de uma caldeira de leito fluidizado circulante para resíduos de madeira da Babcock Ultrapower

Parâmetro	Unidades	Valor
Fluxo máximo de vapor	Kg/s	26,4
Pressão de vapor	MPa	8,5
Temperatura do vapor	°C	511
Eficiência (em relação ao PCS)	%	79,81
Perdas q ₄	%	0,01
Coefficientes de excesso de ar	-	1,24
Umidade do combustível b.u.	%	38,0

Fonte: Belin et al, (1988)

Outra alternativa de caldeira para queima de madeira, são as caldeiras de tubo de fogo de pequena capacidade, que geralmente queimam combustíveis líquidos ou gasosos, mas podem também ser construídas ou adaptadas para queima de madeira (LORA e ZAMPIERI, 2008). A FIG 8 abaixo, mostra o esquema de uma caldeira de tubos de fogo para queima de madeira.

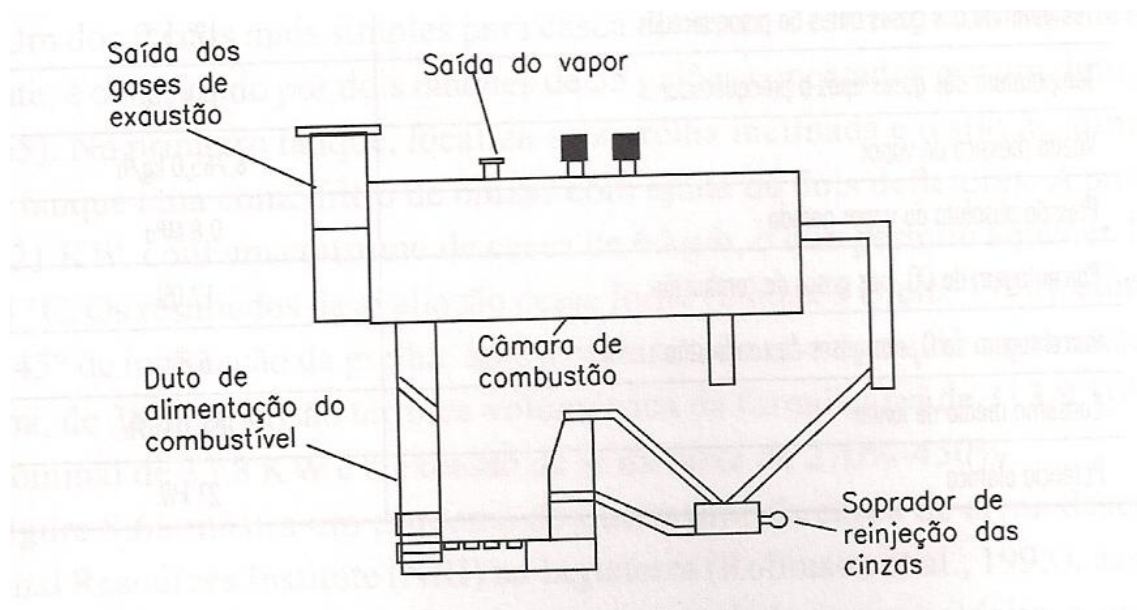


Figura 8 – Caldeiras de tubos de aço com fornalha para a queima de madeira.

Fonte: (Barbger et al., 1987).

Este tipo de caldeira pode ser utilizada nas indústrias de borracha e plástico, alimentícia, têxtil, química, pavimentadora, de tintas e vernizes, de papel e celulose, madeireira, além de sistemas de geração de vapor sem combustão, fornos e prensas, aquecimento indireto de água ou ar, e sistemas de aquecimento em geral.

3.6. Avaliação dos Sistemas de Cogeração

Para Walter, Llagostera e Gallo (1997), com base na Primeira Lei da Termodinâmica, o desempenho de uma planta de cogeração é um procedimento de

comparação de diferentes qualidades termodinâmicas, como calor e potência produzida.

A energia gerada do combustível é aproveitada na geração de potência elétrica de acordo com os ciclos “topping”, onde o rejeito da energia térmica é utilizado no processo produtivo (HUANG, 1996).

Este tópico tem como objetivo explicar e demonstrar equações e parâmetros importantes para demonstrar a eficiência, balanço térmico e perdas de calor para a definição e montagem das caldeiras utilizadas no sistema de cogeração.

3.6.1 Eficiência

A eficiência, ou rendimento da caldeira pode ser entendida como eficiência bruta ou eficiência líquida, considerando o consumo de energia elétrica dos ventiladores, alimentadores de combustível, bombas e equipamentos auxiliares (LORA e ZAMPIERI, 2008).

A energia bruta (%) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\eta_b = Q_u/Q_d^t \times 100 \text{ (balanço térmico direto) onde,}$$

Q_u é calor útil e Q_d^t , calor disponível.

Ainda segundo Lora e Zampieri (2008), o calor útil é a energia consumida para a evaporação de água para alimentação e o superaquecimento do vapor até as condições de pressão e temperaturas requeridas e a energia contida nas águas de extrações contínuas. O calor disponível é referido em relação à unidade de massa do combustível (kg).

3.6.2. Balanço térmico

Segundo Lora e Zampieri (2008), a diferença entre calor disponível (Q_d^t) e calor útil (Q_u) é constituída pelas perdas de calor devido:

- Perdas de calor pela entalpia dos gases de saída da caldeira (Q_2);
- Perdas de calor pela combustão química incompleta (Q_3);
- Perdas de calor pela combustão incompleta das partículas de combustível (Q_4);

- Perdas ao meio ambiente (Q5) pela transferência de calor das paredes externas;
- Perdas de calor com as cinzas da grelha retiradas durante sua limpeza (Q6).

Portanto, a equação do balanço térmico em kj/kg da caldeira é expressa da seguinte forma:

$$Q_d^t = Q_u + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \text{ ou}$$

$$\eta b = 100 - (q_2 + \dots + q_6) \text{ (balanço térmico indireto).}$$

O balanço térmico direto é apropriado para caldeiras em que se usem combustíveis líquidos ou gasosos. Já o balanço térmico indireto, é aplicado em combustíveis sólidos devido à dificuldade de monitoramento do fluxo de combustível.

3.6.3. Leis da Termodinâmica

A característica essencial da energia é sua capacidade de conversão nas diversas formas de energia, podendo adequar-se a situação desejada. Todos os processos de conversão energética são regidos por leis fundamentais da Termodinâmica. Propriedade termodinâmica é qualquer característica mensurável de um sistema aberto ou fechado: pressão, temperatura, massa, volume, densidade, energia. O processo é uma mudança de estado em um sistema que pode ser reversível (à condição inicial) ou irreversível (quando há um efeito residual) (GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

A combinação entre a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica afirma que embora a quantidade total de energia tenha de ser conservada em qualquer processo, a distribuição dessa energia é alterada de maneira irreversível (FERRACIOLI, 1994).

Segundo Goldemberg e Lucon (2008), num estado de equilíbrio, as propriedades termodinâmicas de um sistema isolado não se alteram. A Primeira Lei da Termodinâmica estabelece que a variação total de energia contida em um sistema fechado é igual ao efeito das interações de calor e trabalho que o sistema sofre com o meio, ou seja, a energia não se conserva, não pode ser criada e nem destruída. No caso dos sistemas abertos, a conservação de massa deve ser verificada antes da conservação de energia. Já a Segunda Lei da Termodinâmica ensina que não podemos utilizar todas as formas de energia com a mesma

eficiência, ou seja, sempre há perdas na conversão de energia e nenhum processo é 100% reversível.

Os sistemas de cogeração utilizados, em sua maioria, através da combustão da biomassa utilizada nas caldeiras, gera um vapor de baixa pressão, conhecido como vapor de escape, que é conduzido para a turbina e utilizado mediante a demanda de energia térmica no processo produtivo (VELÁZQUEZ, 2008).

3.7. Crescimento Econômico e Consumo de Energia no Brasil

Nas últimas décadas, o consumo de energia elétrica apresentou índices de expansão bem superiores ao Produto Interno Bruto (PIB), fruto do crescimento populacional nas zonas urbanas, da universalização da oferta e da modernização da economia. O sistema elétrico brasileiro apresenta como característica grandes extensões de linhas de transmissão e um parque gerador predominantemente hidrelétrico. O mercado consumidor, formado por 45 milhões de unidades, é bastante disperso pelo país, e as maiores concentrações estão nas regiões mais desenvolvidas – Sul e Sudeste. Nas regiões Norte e parte do Centro-Oeste, a distribuição elétrica é marcada por muitos sistemas isolados, atendidos por pequenas unidades de geração, em grande parte termelétrica (COMISSÃO ESPECIAL MISTA DESTINADA A ESTUDAR AS CAUSAS DA CRISE DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA NO PAÍS, BEM COMO PROPOR ALTERNATIVAS AO SEU EQUACIONAMENTO, 2002).

De acordo com a Análise Energia (2010), no Brasil, o setor industrial representa 40,7% da energia total consumida, o que causa grande preocupação quanto à situação da eficiência energética brasileira. Desde o ano de 2004, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) juntamente com a Eletrobrás vem realizando campanhas focadas no Procel Indústria (Programa de Conservação de Energia Elétrica), tendo como objetivo principal aumentar a eficiência energética do setor industrial. Assim, as empresas investidoras em projetos de eficiência energética economizam recursos, ganhando em competitividade e aliviando a pressão sobre o aumento da oferta de energia elétrica. A CNI atua na conscientização do setor industrial, estimulando investimentos que sejam favoráveis aos negócios, realizando estudos e levantamentos essenciais para conseguir identificar o que é necessário fazer. Para isso, a CNI em parceria com a Eletrobrás,

através do programa Procel Indústria, estudou casos bem sucedidos no Brasil identificando oportunidades de economia de energia elétrica nos setores industriais. Essas informações foram analisadas a partir das práticas de eficiência industrial que vem obtendo sucesso em 12 países e na União Européia, que é concorrente do Brasil no mercado internacional. Obtiveram-se como resultado nove recomendações para que o Brasil possa conseguir a eficiência energética no setor industrial:

- 1- Associação de ações de eficiência energética a ganhos ambientais, em especial a redução dos gases de efeito estufa;
- 2- Priorização dos setores industriais nos programas governamentais de eficiência energética;
- 3- Aproximação entre a indústria e o governo na construção de programas de eficiência energética;
- 4- Estruturação e difusão de uma sólida base de dados que permita maior segurança nas decisões sobre projetos de eficiência energética;
- 5- Fomento à realização de diagnósticos energéticos de instalações industriais;
- 6- Apoio a contatos de performance com Escos (empresas especializadas em promover eficiência energética) em programas industriais;
- 7- Estímulo às parcerias público-privadas para pesquisa e desenvolvimento de equipamentos e processos industriais eficientes;
- 8- Adoção de normas ISO para consumo de energia;
- 9- Revisão das metodologias de medição e de verificação de resultados de projetos de eficiência energética.

3.7.1. Eficiência na Indústria

No mundo, a indústria é responsável por cerca de 35% do consumo de energia e tem um potencial de 25% para ganhos de eficiência, sendo 30% deste devido a eficiência de motores. Há vários avanços nas tecnologias especializadas na produção de aço, produtos químicos, papel e celulose, alimentação e bebidas. Algumas dessas tecnologias é a recuperação de calor nos sistemas aproveitando o biogás, cogeração de energia e prevenção de perdas físicas de insumos (GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

Grande parte dos processos industriais utilizados atualmente foi desenvolvido em época de energia abundante e barata, motivo pelo qual existem tantas oportunidades e necessidades de melhoria no setor energético para aumentar a competitividade ou para diminuir o nível de emissão de poluentes.

Segundo Goldemberg e Lucon (2008), a regulamentação e padronização são meios altamente eficientes de forçar a tecnologia a se aprimorar mais rapidamente, mas corre o risco de acomodar-se na procura por novas tecnologias. Para evitar problemas como esse, em vez da tecnologia ser adotada, é aconselhável que os governos especifiquem o resultado desejado através de metas compreendidas num certo prazo. Assim, a indústria se sente livre para determinar o melhor meio tecnológico a ser utilizado para alcançar o objetivo desejado.

3.8. Impactos Ambientais do Uso Energético da Biomassa

O uso da biomassa para fins industriais e como combustível doméstico vem provocando desde os tempos passados o desmatamento de vastas zonas do planeta. Esse desmatamento tem um efeito global que constitui uma das causas do aumento de CO₂ na atmosfera. Apesar disso, o uso da biomassa como combustível não aumenta o teor de CO₂ na atmosfera, pois o que é produzido durante a combustão equilibra-se com o CO₂ consumido durante a fotossíntese (TEIXEIRA, PRIMO e LORA, 2008).

Ainda segundo Teixeira, Primo e Lora (2008), as florestas tem um papel importante na diminuição do teor de CO₂ na atmosfera, pois as plantas fixam uma quantidade de CO₂ que corresponde à diferença entre a quantidade absorvida pela fotossíntese e as perdas pela respiração.

No caso específico da produção de carbonato, nas fábricas em que a madeira já é utilizada no processo como insumo, a emissão de poluentes na atmosfera é ainda menor, pois se reduz o consumo de outros tipos de energia, aproveitando-se o vapor e o gás gerados na caldeira, emitindo pouquíssimos gases na atmosfera.

4. METODOLOGIA

Serão apresentadas a seguir as características deste trabalho, cujo objetivo é mostrar o tipo de pesquisa realizada, a origem e o motivo do estudo, e o método utilizado para levantar e interpretar os dados e informações coletadas.

4.1. Tipos de Pesquisa

A pesquisa científica consiste em um conjunto de ações que objetivam propor soluções para problemas sugeridos por meio de procedimentos racionais e sistemáticos (GIL, 2002).

O trabalho em questão é um estudo de caso, em que será feita uma pesquisa quantitativa, exploratória e bibliográfica.

Segundo Silva e Menezes (2000), esta pesquisa classifica-se como quantitativa, pois possibilita quantificar as informações levantadas neste estudo. A tradução dessas informações constituídas de variáveis numéricas gera desta maneira opiniões e informações, que possibilitarão sua classificação e posterior análise.

O objetivo de uma pesquisa exploratória é familiarizar-se com um assunto ainda pouco conhecido, pouco explorado. Ao final de uma pesquisa exploratória, você conhecerá mais sobre o assunto estudado, e estará apto a construir hipóteses (GIL, 2008).

A pesquisa bibliográfica se desenvolve a partir de materiais existentes, como livros e artigos científicos. A grande vantagem da pesquisa bibliográfica é que permite ao pesquisador uma gama de fenômenos muito ampla ligada diretamente ao estudo realizado (GIL, 2007).

4.2. Objeto de Estudo

O desenvolvimento do trabalho é baseado no levantamento dos dados de uma fábrica produtora de carbonato de cálcio precipitado situada no centro-oeste de

Minas Gerais, região rica em jazidas de calcário, principal matéria-prima utilizada na fabricação de carbonato de cálcio.

Qualidade, sistema de melhoria contínua, desenvolvimento de soluções tecnológicas que atendam e superem as necessidades e expectativas do mercado, garantem a disponibilidade de produtos com qualidade superior, a custos competitivos, assegurando a satisfação dos clientes e o crescimento do empreendimento. Estas são as principais características da indústria.

Desenhada e implementada para produzir carbonato de cálcio precipitado em pó, a indústria está em funcionamento há pouco mais de 1 ano e monitora todo o processo de fabricação para garantir a qualidade do produto, seguindo os requisitos dos clientes e das normas externas e internas em vigor, visando atender aos mercados de tintas, alimentícios, cosméticos e de plásticos. Além disso, a empresa conta com profissionais qualificados e com grande experiência nas áreas de produção, qualidade, gestão comercial, entre outras.

O trabalho consiste em verificar a viabilidade econômica da implantação de um sistema de cogeração de energia, nas condições atuais de consumo e produção da unidade fabril, utilizando como combustível a lenha de eucalipto.

4.3. Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados foi realizada por meio de dados da unidade fabril, auxiliada pela pesquisa bibliográfica baseada nos principais autores e tecnologias atuais utilizadas, e feito uma pesquisa orçamental nas principais empresas fabricantes e montadoras de sistemas de cogeração, para verificar a viabilidade econômica da instalação de uma termelétrica.

4.4. Análise e interpretação dos dados

Como os dados gerados são de natureza quantitativa, a interpretação das informações foi realizada através do *Microsoft Excel versão 2003* e *Microsoft Word 2003*, para facilitar as análises e resultados da pesquisa na elaboração de gráficos e tabelas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. A indústria estudada

Este trabalho descreve todo o processo necessário para a Geração de vapor na fábrica, bem como a eficiência e capacidade de geração de energia elétrica.

Foi feito um fluxograma para detalhamento do processo de fabricação do carbonato de cálcio precipitado utilizando o software Power Point versão 2003 (FIG 9).

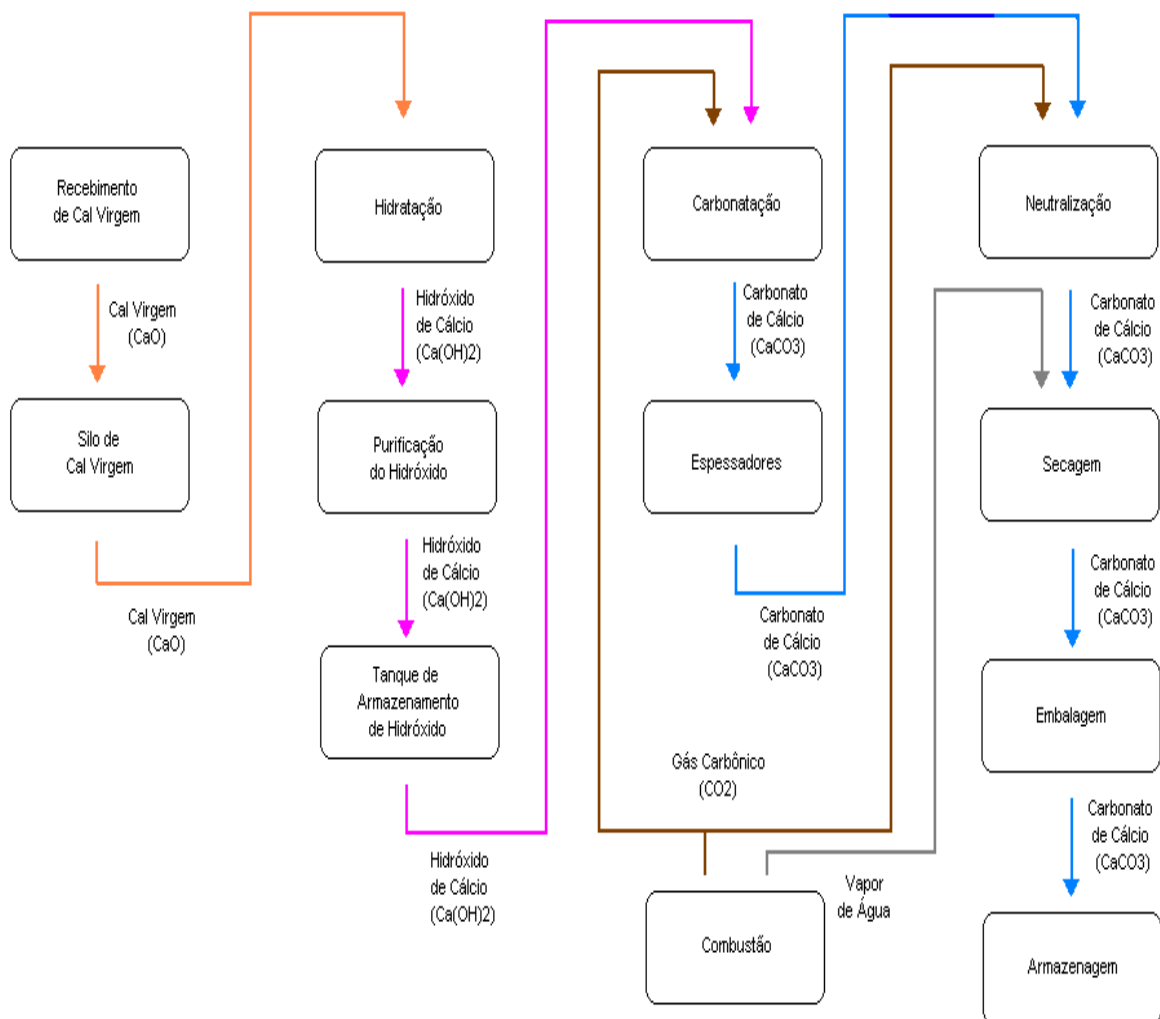


Figura 9 - Mapa do processo de fabricação de PCC

Fonte: Dados da pesquisa (2011)

A FIG 9 acima representa o processo de produção de carbonato de cálcio precipitado. Ele é dividido em: Hidratação da Cal virgem, Carbonatação, Geração de vapor e Dióxido de Carbono, Espessamento, Neutralização, Secagem e Embalagem.

Inicialmente é recebida a Cal virgem (CaO) e feita a armazenagem em um silo. Do silo, a Cal é levada através de uma correia transportadora para o setor de Hidratação, que por meio de um reator, hidrata a Cal reagindo com água e produz o Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)_2). O Hidróxido de Cálcio possui pH próximo a 13, com temperaturas de aproximadamente 100°C , garantindo a total eliminação de contaminantes microbiológicos, que não resistem a altas temperaturas. Em seguida, o Hidróxido de Cálcio é levado por meio de bombeamento para os Carbonatadores.

Após serem carregados, os Carbonatadores recebem o Dióxido de Carbono (CO_2), que vem da combustão na queima da lenha na fornalha da caldeira, reage e se transforma em carbonato de cálcio (CaCO_3), reduzindo o pH abruptamente de 13 a valores entre 9 e 10. Após a reação, é feita a descarga dos tanques de Carbonatação e o carbonato de cálcio é direcionado aos Espessadores para aumento de concentração.

Após concentrado, o carbonato passa pelos Neutralizadores, garantindo a completa neutralização, e segue para a Secagem, onde por meio de DD's (Drun Dryers) é seco pelo vapor produzido na caldeira e, em seguida, direcionado para embalagem e armazenamento.

5.2. Caldeiras utilizadas e a capacidade de geração de vapor

Para a geração de vapor e Dióxido de Carbono, existem 3 caldeiras disponíveis que entram em funcionamento de acordo com a programação e necessidade de produção. Elas são abastecidas à lenha com período de secagem entre 60 e 120 dias, tempo em que se obtém melhor relação consumo/rendimento na produção, semelhantes a caldeira da FIG 10.

FIGURA 10 – Caldeira a Biomassa



Fonte: Dados da pesquisa (2011)

A Pressão Máxima de Trabalho Admissível (P.M.T.A.) pode variar de acordo com a lenha utilizada no consumo, devido o ponto de secagem e umidade da madeira, conseqüentemente a produção dependente da geração de vapor.

As características e capacidade das caldeiras utilizadas são apresentadas na TAB 4.

TABELA 4 – Caracterização das caldeiras

Fabricante	Modelo	Capacidade	P.M.T.A.	Área de troca
CBC Indústrias Pesadas S/A	Flamotubular – H3	5.400 kcal /hora	7,04 kg/cm ²	162,2 cm ²
SENIO – Combustão Controlada Ltda	Mixta/Horizontal	9160 kcal/hora	10,5 kg/cm ²	302,66 cm ²
ATA Combustão Técnica	ATA H3	6200 kcal/hora	8,44 kg/cm ²	241 cm ²

Fonte: Dados da pesquisa (2011)

5.3. Ciclos

Caracterizado por Velázquez (2000), o ciclo ideal a ser utilizado na Cogeração de Energia por Biomassa de madeira deve ser o Ciclo Topping. Nele, o vapor será utilizado primeiramente para produzir eletricidade e o sistema atenderá os requisitos de energia térmica do processo, recuperando depois o vapor descarregado pela turbina no processo. Os ciclos Topping apresentam real economia na energia primária, pois a maioria das aplicações do processo requer vapor de baixa pressão convenientemente usado neste ciclo.

5.4. Consumo médio de energia elétrica e madeira

Sob condições normais de produção e funcionamento, a indústria paga em torno de R\$95.00,00 (noventa e cinco mil reais)/mês gastando em média 650 kWh (kiloWatts/hora). Consome cerca de 3.500 metros estéreo/mês de lenha, considerando a umidade do Eucalipto entre 16 a 30%, e peso específico médio de 400 kg/mst (quilograma por metro estéreo) ou 0,4 ton/mst (tonelada por metro estéreo).

Transformando o consumo de energia elétrica/mês em consumo energia elétrica/ano tem-se:

$$\text{Consumo} = 650 \text{ kWh} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ dias};$$

$$\text{Consumo} = 5.694 \text{ MW (MegaWatts)/ano.}$$

Então, a indústria gasta em média R\$1.140.000,00 (um milhão cento e quarenta mil reais) anuais consumindo 5.694 MW.

Transformando o consumo em mst/mês para consumo ton/ano tem-se:

$$\text{Consumo} = \text{Consumo mensal} \times \text{peso específico Eucalipto} \times \text{n}^\circ \text{ de meses};$$

$$\text{Consumo} = 3.500 \text{ mst} \times 0,4 \text{ ton/mst} \times 12 \text{ meses};$$

$$\text{Consumo} = 16.800 \text{ ton/ano.}$$

Considerando-se o valor de mercado à R\$55,00/mst de lenha, os gastos anuais são:

$$\text{Consumo} = 3.500 \text{ mst} \times \text{R\$55,00} \times 12 \text{ meses};$$

$$\text{Consumo} = \text{R\$2.310.000,00 (dois milhões trezentos e dez mil reais)/ano.}$$

A potência instalada para cogeração dependerá exclusivamente do consumo anual de energia elétrica e lenha de Eucalipto.

5.5. Capacidade de geração de energia elétrica

A Eletrobrás, em 1985, elaborou um Manual de Pequenas Centrais Termelétricas para orientar a criação de projetos novos, no qual foram adotadas as seguintes hipóteses de análise para as situações, conforme TAB 5.

TABELA 5 – Indicadores básicos de pequenas centrais termelétricas a biomassa

Potência instalada (kw)	Tecnologia recomendada	Consumo anual de lenha (ton)	Custos de referência	
			(US\$/kw)	(US\$/kwh)
48	Gaseificador	1.104	1.442	56,4
120	Gasogênio	2.760	743	39,0
240	Gasogênio	3.679	502	29,7
700	Turbina a vapor	13.735	1.456	58,4
1.000	Turbina a vapor	16.863	2.588	78,2
1.600	Turbina a vapor	25.019	2.004	63,3
3.000	Turbina a vapor	45.622	1.568	52,0
5.000	Turbina a vapor	71.483	1.383	46,4

Fonte: Eletrobrás (1985)

Sob as condições atuais de consumo na indústria, seria necessária a montagem de uma pequena termelétrica a biomassa com capacidade de geração de 1000 kw, suficientes para suprir as necessidades da fábrica e vender o excedente para pagamento do investimento, consumindo 16.863 ton/ano de lenha, somado ao consumo atual de 16.800 ton/ano, considerando sem o reaproveitamento de vapor, conforme mostra na TAB 6.

TABELA 6 – Consumo de lenha para cogeração de energia

Consumo de lenha em ton/ano	16.800
Consumo de lenha para produção de energia em ton/ano	16.863
Consumo total em ton/ano	33.663

Fonte: Dados da Pesquisa (2011)

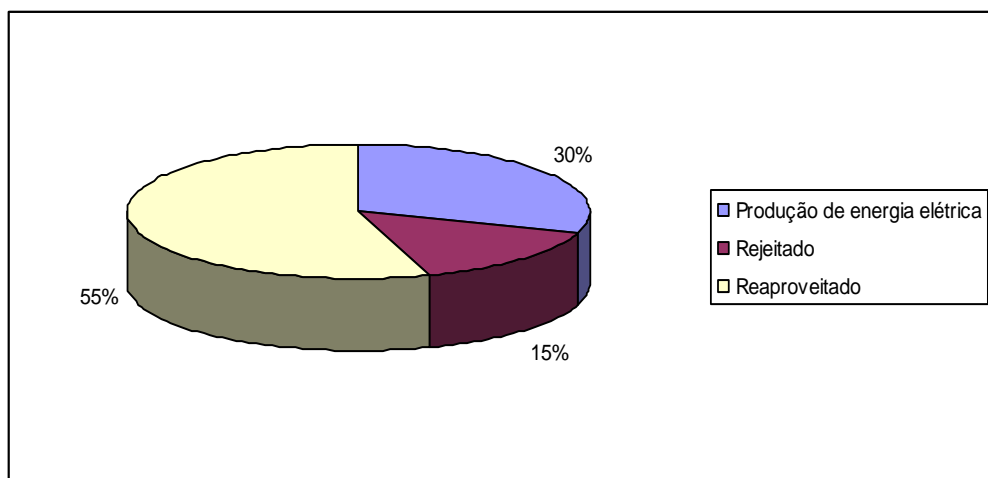
Para análise do preço de compra e possível venda de kW, após ser instalada a usina de cogeração, serão utilizados dados atuais da pesquisa:

Preço do KWh = R\$1.140.000,00/5694 MW;

Preço do KWh= R\$0,20 (vinte centavos).

De acordo com a UNICAMP (2010), numa Solução de Cogeração, do vapor lançado na turbina, 30% é utilizado para produção de energia elétrica. Do vapor de descarga, 15% é rejeitado e 55% é reaproveitado no processo, conforme o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Aproveitamento de vapor no processo de Cogeração



Fonte: Unicamp (2010)

Com o reaproveitamento, considerando-se que a usina de cogeração funcione com 95% da Potência Instalada, consuma 16.863 ton/ano de lenha de Eucalipto e reaproveite 55% do vapor no processo, tem-se o consumo total de lenha necessário na cogeração e no processo:

Consumo = 16.863 + (16.863 ton x 55% - 16.800 ton);

Consumo = 16.863 + 7.525,35 ton;

Consumo = 24.388,35 ton/ano.

Com base nos dados da média da capacidade de geração de energia, desconsiderando paradas programadas, paradas não programadas como manutenção corretiva, falhas operacionais ou intempéries e que a usina atue com uma eficiência de 95% da Potência Instalada. Por meio destas considerações, a TAB 7 mostra o valor total da receita gerada por ano de R\$ 420.480,00, sendo o valor médio para cada KW exportado de R\$160,00 (CAMPOS, 2010).

TABELA 7 – Valor da capacidade total de geração de energia anual

Dias funcionamento da caldeira	365
Aproveitamento da Potência Instalada	95%
Valor da energia (R\$/MW)	R\$160,00
Total de geração por ano (MW)	8.322
Valor da energia gerada (R\$)	R\$1.331.520,00

Fonte: Dados da pesquisa (2011)

O valor de R\$1.331.520,00 se trata da capacidade total de energia gerada por ano, ou seja, apenas 31,58% da energia é vendida e o restante utilizado para o próprio consumo, tornando a fábrica auto-suficiente em energia elétrica. Com base na capacidade de exportação, a TAB 8 mostra o valor da receita de energia exportada por ano.

TABELA 8 – Valor da capacidade de excedentes de energia anual

Média de energia exportada (MWh)	0,3
Total de geração por ano (MW)	2.628
Valor da energia exportada (R\$)	R\$ 420.480,00

Fonte: Dados da pesquisa (2011)

5.6. Viabilidade do Investimento

Para demonstrar a viabilidade do investimento, a TAB 9 faz um comparativo analisando os dados de consumo de energia elétrica e lenha de Eucalipto antes e após a instalação de uma usina de cogeração de energia.

TABELA 9 - Comparativo da situação atual x cogeração de energia

	Processo Atual	Cogeração de energia
Consumo de lenha de Eucalipto (ton)/ano	16.800	24.388,35
Custo lenha de Eucalipto (R\$)/ano	2.310.000,00	3.353.398,13
Consumo de energia elétrica (R\$)/ano	1.140.000,00	0
Venda de excedentes de energia/ano	0	420.480,00
Custo Total (R\$)/ano	3.450.000,00	2.932.918,13

Fonte: Dados da pesquisa (2011)

De acordo com os dados da pesquisa, o processo de Cogeração de energia teria lucratividade anual de R\$ 517.081,87, se comparado ao processo atual.

Contabilizando o lucro com a venda de excedentes de energia e a economia de energia elétrica gerada pela auto-suficiência, poderia se chegar a uma redução de custos de R\$43.090,16 mensais, a partir da quitação do investimento + custos de manutenção e mão-de-obra, conforme mostra a TAB 10.

TABELA 10 – Lucratividade do processo de cogeração de energia

Custo lenha de Eucalipto (R\$)	(+) 1.043.398,13
Energia elétrica (R\$)	(-) 1.140.000,00
Venda de excedentes de energia elétrica (R\$)	(-) 420.000,00
Lucratividade anual (R\$)	517.081,87
Lucratividade mensal (R\$)	43.090,16

Fonte: Dados da pesquisa (2011)

6. Conclusão

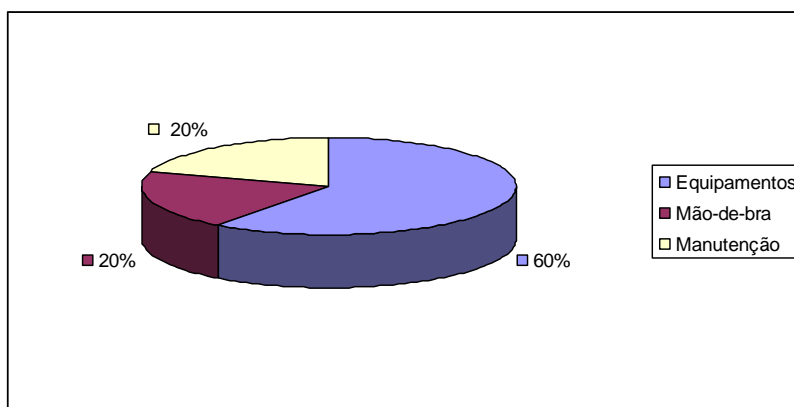
Foram analisados no trabalho os principais sistemas de cogeração, dando ênfase nos processos que utilizam como combustível madeira ou lenha de Eucalipto, a fim de reduzir os custos com energia elétrica, redução dos impactos ambientais e diversificação da matriz energética brasileira.

É de grande importância a implantação de sistemas alternativos energéticos visando suas vantagens ambientais e sociais. Para isso, são necessários maiores investimentos do governo na implementação de políticas que possam viabilizar a instalação de sistemas de cogeração por meio de biomassa em grande escala.

No curto prazo, a geração de eletricidade a partir de biomassa deve expandir-se em nichos de mercado, essencialmente com o aproveitamento de biomassa residual. A velocidade com que ocorrerão os avanços no curto prazo dependerá do ambiente institucional – quanto mais favoráveis as condições, maior a velocidade – e da oferta da biomassa a baixo custo, sendo uma questão crucial. No caso específico do Brasil, é importante salientar que não seja perdida a oportunidade associada à expansão do segmento sucroalcooleiro, no qual o potencial é muito expressivo. Para isso, é necessário desenvolver tecnologia, assegurar a oferta e criar as condições adequadas.

No estudo em questão, conclui-se que a empresa adquire auto-suficiência energética. Os custos referentes a manutenção, mão-de-obra e equipamentos são distribuídos como mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Custos do Sistema de Cogeração



Fonte: Dados da pesquisa (2011)

A implantação do sistema de cogeração de energia utilizando apenas o lucro obtido no processo é viável, desde que os custos dispensados sejam de aproximadamente R\$2.585.000,00 quinquenais, para que o investimento seja pago em até 5 anos e, à partir daí, venda excedentes de energia ou pelo menos supra as necessidades energéticas da unidade fabril.

REFERÊNCIAS

ABRAF, **Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas**, Anuário Estatístico da ABRAF – ano base 2005, Brasília, ABRAF, 2006.

BATHIE, W. **Fundamentals of Gas Turbines**, John Wiley e Sons Inc, 1996.

BARBGER, P.; MORKIN, M.; WALSH, J. L.; VEITCH, J. **Status of industrial wood fueled systems**, American Society of Agricultural Engineers, 1987.

BARROS, F. S. **Análise das condições de operação de turbinas a gás industriais utilizando biomassa gaseificada**, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Agosto, 1998.

BELIN, F.; JAMES, D. E.; WALKER, D. J.; WARRICK, R. J. **Waste wood combustion in circulating fluidized bed boilers**, Second International Conference on Circulating Fluidized Beds, Compiègne, Technical paper BR-1333, Babcock and Wilcox, 1988.

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de Eucalyptus saligna Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**,

BORBA, R. F. **Balanço Mineral Brasileiro**, 2001.

CAMPOS, T. A. R. **Análise da capacidade de produção de energia de sistemas de cogeração por meio da biomassa e sua representação na matriz energética Brasileira**, 2010.

CNI, **Eficiência Energética: Ainda há muito a fazer para alcançá-la**, Análise Energia – Especial Energias Renováveis, 2010.

COELHO, S. T. **Avaliação da Geração de Eletricidade a partir de bagaço de cana em Sistemas de Gaseificador/ Turbina a Gás**. (Dissertação de Mestrado)

Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 1992.

COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia – Conceito e Tecnologias, Disponível em <http://www.cogensp.com.br/cog_conceito.asp> Acesso em 24/10/2010.

COMISSÃO ESPECIAL MISTA DESTINADA A ESTUDAR AS CAUSAS DA CRISE DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA NO PAÍS, BEM COMO PROPOR ALTERNATIVAS AO SEU EQUACIONAMENTO. O setor elétrico brasileiro . In: **A crise de abastecimento de energia elétrica**, Relatório, 2002, Brasília: Senado Federal, Secretaria Especial de Editoração e Publicações, 2002. p. 11-13.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; AYARZA, J. A. C. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

COUTO, L.; MULLER, M. D. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

ELETROBRÁS. **Manual de pequenas centrais termelétricas**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1985, vols. 1-2.

ENERGIA, CONGRESSO BRASILEIRO. Reestruturação do setor elétrico no Brasil. In: Planejamento e Políticas Energéticas, 1999, Rio de Janeiro. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Energia**, COPPE/UFRJ, 1999.

FERRACIOLI, L. **Commonsense Reasoning About Processes**: A Study of Ideas About Reversibility. Dissertação (Doctor of Philosophy) – Institute of Education, University of London., 1994.

FILHO-DEARBORN, H. R. C. **Aspectos Relacionados a Eficiência em Caldeiras a Bagaço.**

FREITAS, J. C. C., CUNHA, G. A., EMMERICH, F. G. **Physical and Chemical properties of a Brazilian Peat Char as a function of HTT**, *FUEL*, 1997.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisas.** 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** 3ª Ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento** – 3. ed. ver. ampl. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

GORBATY, M. L. **Prominent frontiers of coal science: past present and future**, *FUEL*, 1994.

GUARINELO, J. F. F. **Avaliação Termoeconômica de um Sistema de Cogeração Proposto para um Pólo Industrial**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1997.

HORLOCK, J. H. **Cogeneration: Combined Heat and Power (CHP)**, Rieger Publishing Company, Malabar, 1997.

HUANG, F. F. **Performace Assessment Parameters of a Cogeneration System**, Proceedings: Efficiency, Costs, Optimisation, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems. ECOS 96, 1996.

HUGOT, E. **Handbook of cane sugar engineering.** Nova Iorque: Elsevier Publishing Co, 1972.

JENKINS, B. M. **Fuel properties for biomass materials, International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture: The role of Biomass fuels**, Delhi, 1990.

LIMA, C. R.; BAJAY, S. V. **A reposição florestal obrigatória e o planejamento energético regional**. Revista Baiana de Tecnologia – TECBAHIA. Camaçari: Editec, 2000.

LIZARRAGA, S. J. M. **Aspectos termodinámicos tecnológicos y economicos**, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 1994.

LORA, E. E. S.; ZAMPIERI, M. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

LOZANO, M. **Cogeneración**, Area de Máquinas y Motores Térmicos. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, 1998.

NOGUEIRA, L. A. H.; WALTER, A. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração da dissertação**. Florianópolis: UFSC/PPGEP/LED, 2000.

TEIXEIRA, F. N.; PRIMO, K. R.; LORA, E. E. S. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

TGM Turbinas – Principais Tipos de Turbinas, Disponível em < <http://www.tgmturbinas.com.br/> > Acesso em 04/11/2010.

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Disponível em < <http://www.fem.unicamp.br/~em672/Unicamp-Cogeracao.PDF> > Acesso em 15/05/2011.

WALTER, A. C. S., LLAGOSTERA, B. J., GALLO, W. L. R. **Analysis of thermodynamics performance parameters and cost allocation methods in cogeneration systems**, TAIES 97, Thermodynamics Analysis and Improvement of Energy Systems, 1997.

WYLEN, J. G. V., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**, Tradução da 5ª Edição Americana – Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1998.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil**, Dissertação de Mestrado,

VIEIRA, S., OLIVEIRA JR, S. **Estudo de sistemas de cogeração e geração termelétrica através da análise termoeconômica**, Proceedings of the 7th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, Novembro, 1998.