

ÉZIO VINICIUS SANTOS

Co-geração de energia a partir de gases provenientes da carbonização

CURITIBA - PR

2013

ÉZIO VINICIUS SANTOS

Co-geração de energia a partir de gases provenientes da carbonização

Trabalho apresentado para obtenção parcial do título em Gestão Florestal no curso de Pós-Graduação em Gestão Florestal do Departamento de Economia Rural e Extensão, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Dimas Agostinho Silva
Co-orientadora: MsC Cymara Regina Oshiro

CURITIBA - PR

2013

ÉZIO VINICIUS SANTOS

Co-geração de energia a partir de gases provenientes da carbonização

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gestão Florestal, do curso de Pós-Graduação em Gestão Florestal, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, à seguinte Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho Silva

Prof.

Universidade Federal do Paraná

Prof.

Universidade Federal do Paraná

Curitiba,

de

de 2013.

AGRADECIMENTOS

O Deus, que se mostrou criador, que foi criativo. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deu, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

À minha esposa, pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pelo carinho, a paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus filhos que vários momentos os privaram de minha atenção devida à dedicação aos estudos e ao trabalho.

A Aperam Bioenergia que disponibilizou todos o recursos necessários para realização do trabalho.

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhora tudo o que tenho produzido na vida.

Ao Dimas Agostinho Silva pela sua dedicação e pela orientação e profissionalismo em transmitir todo conhecimento e informações que auxiliaram na elaboração e desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores do curso, que nos auxiliaram na construção de uma base sólida e segura para o desenvolvimento intelectual ao longo do curso e para o nosso desenvolvimento profissional.

RESUMO

No mundo cresce de maneira acelerada a necessidade de consumo de energia elétrica juntamente com a busca de produzir a mesma com o menor impacto possível ao ambiente. A Co-geração é definida como um processo de produção e utilização combinada de calor e eletricidade, proporcionando o aproveitamento de mais de 70% da energia térmica proveniente dos combustíveis utilizados nesse processo. Na Cogeração, o sistema parte de um recurso, com um ciclo termodinâmico, obtendo-se dois produtos finais, acima referidos. O calor que seria dissipado é recuperado dos gases de escape e produz vapor, ar quente e refrigeração, que podem ser utilizados nos processos industriais, gerando mais energia elétrica, por exemplo. O ganho com eficiência neste sistema proporciona a produção de uma energia elétrica confiável, com baixo custo, ficando a unidade industrial ou comercial independente da qualidade de fornecimento do distribuidor de energia. Com intuito de descrever, analisar e entender o processo de obtenção de energia a partir da co-geração, este trabalho retratará o tema de maneira sucinta. Para tal estudo este trabalho tem como foco principal a co-geração a partir dos gases provenientes da carbonização da madeira, sendo embasado pelo estudo de caso da empresa Aperam Bioenergia.

Palavras Chave: Gases, carbonização, queimadores.

ABSTRACT

Co-Generation Energy from Gases Coming from Charring

In the world increases rapidly the need for electricity consumption , along with the pursuit of producing the same causing the least possible impact on the environment. The Co - generation is defined as a process of production and use of combined heat and power , providing the use of more than 70 % of the thermal energy from fuels used in this process . In the co- generation system is part of a resource, with a thermodynamic cycle , to obtain two end products , above . The heat that would be dissipated is recovered from the exhaust gas and produces steam , hot air and cooling , which can be used in industrial processes generate more power , for example. The efficiency gain with this system provides the production of a reliable power , at low cost , being the industrial or commercial unit independent of the quality of supply of power distributor . In order to describe, analyze and understand the process of obtaining energy from co - generation , this paper will portray the issue so raised . For this study this work will focus mainly cogeneration from the gases from the carbonization of wood , being grounded by the case study company Aperam Bioenergy .

Key Words: Gases, carbonization, burners.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 HISTÓRICO DA CO-GERAÇÃO	11
2.2 CICLOS DE CO-GERAÇÃO.....	13
2.2.1 ciclo Rankine;.....	13
2.2.2 ciclo Brayton ;.....	13
2.2.3 ciclo Combinado.....	13
2.3 POTENCIAIS DOS SETORES INDUSTRIAIS	16
2.3.1 Co-geração na Indústria Sucroalcooleira	16
2.3.2 Co-geração na Indústria de Papel e Celulose.....	17
2.3.3 Co-geração no Setor Terciário	18
2.4 TECNOLOGIAS DE CO-GERAÇÃO	19
2.4.1 Caldeiras.....	19
2.4.2 Turbinas a gás	21
2.4.3 Turbinas a vapor	23
2.4.4 Motores de Combustão Interna.....	25
2.5 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA CO-GERAÇÃO	25
2.6 ASPECTOS GERAIS	26
2.6.1 Temperatura.....	26
2.6.2 Calor	27
2.6.3 Calor Específico	27
2.6.4 Calor Latente.....	28
2.6.5 Poder Calorífico	28
2.6.6 Poder Calorífico Superior.....	29
2.6.7 Poder Calorífico Inferior	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 SISTEMA DE CO-GERAÇÃO	32
4.2 BALANÇO DE GASES	32
5. CONCLUSÕES.....	36

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
---	-----------

LISTA

Figura 1 – Modelo de ciclo Rankine.....	14
Figura 2 – Modelo de ciclo Brayton	14
Figura 3 – Modelo de ciclo Brayton	15
Figura 4 – Instalação de caldeira convencional	20
Figura 5 –Instalação de caldeira convencional	21
Figura 6 – Turbina a gás	22
Figura 7 – Turbinas a vapor: (contrapressão) (condensação)	24
Figura 8 – Balanço energético forno Rac-700.....	30
Tabela 1- Balanço energético forno Rac-700	31
Tabela 2- Relação madeira carvão forno Rac-700	32
Tabela 3- Balanço de massa forno Rac-700.....	32
Tabela 2- Concentração de gases na carbonização forno Rac-700.....	33
Figura 9 – Planejamento de descarga forno Rac-700	35
Figura 10 – Sistema de co-geração de energia.....	35

1. INTRODUÇÃO

A partir da evolução industrial e da globalização atual, atrelado com a facilidade e necessidade de utilização produtos eletrônicos, o consumo de energia vem crescendo, sendo de forma exponencial nos últimos anos. Para atender tais demandas se faz necessário a busca de novas tecnologias e o aproveitamento de recursos antes inexplorados, relacionando processos produtivos quaisquer com produção de energia a partir de resíduos ou subprodutos do mesmo. Para tal dá-se o nome de “Co-geração” de energia.

Co-geração de energia é definida como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil, de acordo com Oddone (2001), considerando que as formas de energias úteis mais freqüentes são a energia mecânica (movimentar máquinas, equipamentos e turbinas de geração de energia elétrica) e a térmica (geração de vapor, frio ou calor). O mesmo autor salienta que a cogeração apresenta alta eficiência energética, pois não há o desperdício de energia térmica (como ocorre nas termoelétricas puras), pois a energia “residual” é utilizada em processos industriais, como secagem, evaporação, aquecimento, cozimento, destilação, etc.

A co-geração não é uma tecnologia nova e tem sido utilizada há anos em várias unidades industriais como um meio econômico de satisfazer, parcial ou totalmente, as suas necessidades térmicas e elétricas. A co-geração de energia, a partir dos gases gerados no processo de carbonização em fornos de alvenaria vem se mostrando cada vez mais atrativa e viável devido o grande poder calorífico dos gases e o crescente aumento das plantas de carbonização.

A conversão do total de gases e líquidos gerados pela indústria de produção de carvão vem crescendo cada vez mais e tornando necessárias as ações sistemáticas que minimizem tais impactos.

Mediante tais argumentações temos uma enorme jazida a explorar, de concepção simples e eficaz, fundamentando este trabalho em descrever o como, o quanto, e qual o retorno de um investimento desta magnitude.

Segundo dados da Sociedade de Investigações Florestais (Painel florestal 2004) o Brasil possui cerca de 7 milhões de hectares de florestas plantadas, onde dos mesmos é produzido cerca de 10 milhões de toneladas de carvão por ano, que ao considerarmos os gases liberados na carbonização teríamos um poder calorífico capaz de produzir 1GW de energia elétrica.

Findando estas argumentações existem hoje algumas empresas da área florestal que vem desenvolvendo trabalhos iniciais para suportar tal projeto, pois a produção de energia elétrica é uma associação de tecnologia, processo de produção de carvão, processo de queima de gases, processo de secagem de madeira, processo de co-geração de energia.

Por fim temos a seguir um detalhamento do processo, e de qual tecnologia empregar para se ter um projeto viável e com extrema atratividade social, ambiental e financeira.

O mercado de energia elétrica no Brasil apresenta variações no preço do kWh, mas que em média podemos considerar R\$0,33 por kWh (M.M.E,2010). A capacidade de produção de energia elétrica segue uma relação de aproximadamente 1MW para cada 1000 toneladas de carvão produzido por mês, (Aperam Bioenergia, 2012), desta forma a arrecadação gerada no processo de co-

geração trará uma nova oportunidade de negócio aumentando consideravelmente a receita das empresas.

Outro ponto de extrema importância é o investimento em um sistema de secagem integrado possibilitando o aumento de 2 pontos percentuais no Rendimento Gravimétrico no processo de carbonização (Aperam Bioenergia, 2012).

A partir dos dados acima descritos, este trabalho tem como **proposta descrever com parâmetros técnicos o processo de co-geração de energia proveniente da queima de gases gerados na carbonização da madeira.**

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA CO-GERAÇÃO

Os primeiros sistemas de co-geração (termelétricas) somente surgiram no final do século XIX, quando o fornecimento de energia elétrica ainda era raro pelas geradoras. Por volta de 1880 foram construídas as primeiras plantas de geração elétrica, época em que a baixa tensão de geração limitava a cobertura de ação da rede de distribuição a uma pequena distância em torno do ponto de produção. Posteriormente, com a geração de energia em corrente alternada e o uso de transformadores de alta tensão, aumentou-se o raio de atuação dos sistemas de distribuição (LORA, 2004).

Em 1905, havia uma grande competição entre as empresas existentes, na busca de um maior espaço e um mercado em expansão. Com o passar dos anos a centralização foi ganhando espaço na indústria elétrica como consequência da contínua melhoria dos serviços realizados e de uma melhoria na qualidade da energia fornecida (LINERO, 2006).

O Pós-Guerra representou, em 90% do mundo, um chamado de ciclo virtuoso na indústria elétrica. Quanto maiores as taxas de crescimento da demanda, maior o investimento em inovações tecnológicas. As tecnologias implementadas aos sistemas de transmissão favoreceram a interconexão de sistemas e mercados. No século passado, com o crescimento dos sistemas elétricos nacionais e a facilidade de obtenção de energia elétrica, principalmente pelo custo baixo, o sistema de co-geração foi perdendo espaço entre os consumidores. Desse modo, houve grande redução na utilização do sistema, chegando a atingir na Europa 15% e nos Estados Unidos um total de 5% de consumidores da tecnologia de co-geração no final dos anos 60 (LORA, 2004).

Mas com o melhoramento tecnológico das turbinas a gás e motores de alta capacidade para atender as necessidades de consumo, a co-geração passou a ganhar força entre os consumidores, por volta da década de 80. Cada vez mais a sociedade moderna está dependente de um bem tão importante e escasso que é a energia. As fontes (petróleo, carvão mineral) amplamente utilizadas para obtenção de energia, por não serem renováveis fizeram surgir de um novo conceito, designado por desenvolvimento sustentado, que consiste na utilização racional da energia e na satisfação das necessidades energéticas (LINERO, 2006).

Os sistemas de co-geração são aqueles em que se faz simultaneamente a geração de duas formas de energia, e elétrica e a térmica, a partir de um mesmo combustível, tais como os derivados de petróleo, o gás natural, o carvão ou a biomassa. Um sistema de co-geração bem dimensionado e balanceado do ponto de vista da porcentagem final de cada uma das duas formas de energia aumenta o rendimento global da utilização do combustível, atuando, assim, no sentido do incremento da eficiência energética (LINERO, 2006). Atualmente, dedica-se grandes investimentos e meios de investigação ao desenvolvimento de recurso às energias renováveis e à produção centralizada de energia e calor.

2.2 CICLOS DE CO-GERAÇÃO

Um projeto de central de co-geração não atende apenas às demandas operacionais descritas pelo processo, mas também consegue garantir o nível de excedentes planejado com eficiência (BALESTIERI, 2003).

Caso não aconteça isso, as falhas na geração e a queda de eficiência ocasionarão aumentos nos custos de operação e manutenção.

São três os principais ciclos utilizados nas centrais de co-geração:

2.2.1 Ciclo Rankine;

2.2.2 Ciclo Brayton ;

2.2.3 Ciclo Combinado.

Sendo também importante salientar a existência do Ciclo Diesel, de grande utilização na Europa e Estados Unidos (BALESTIERI, 2003).

O Ciclo Rankine (Figura 1) pode ser colocado em operação com o uso de caldeiras aquatubulares de alta pressão associadas a turbinas de Condensação e Extração ou turbinas de Contrapressão. É o ciclo utilizado nas indústrias sucroalcooleiras. A água é bombeada, aquecida e transformada em vapor por caldeiras. O vapor produzido passa por turbinas que acionam geradores. O vapor que “sobra” é condensado e volta ao ciclo. A bomba e a turbina são alimentadas separadamente por energia (BALESTIERI, 2003).

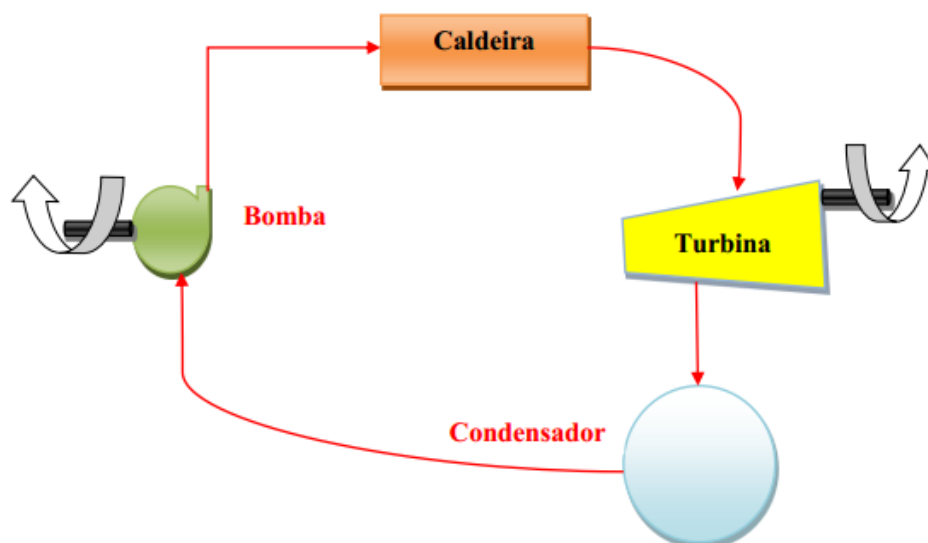


FIGURA 1 – Modelo de ciclo Rankine
FONTE: BALESTIERI (2003)

O Ciclo Brayton (Figura 2) faz uso de conjuntos geradores acoplados. Utilizados em turbinas a gás, onde troca energia com água para gerar vapor em caldeiras de recuperação nos processos que só admitem aplicações indiretas, por não poderem ser contaminados, vide figura:

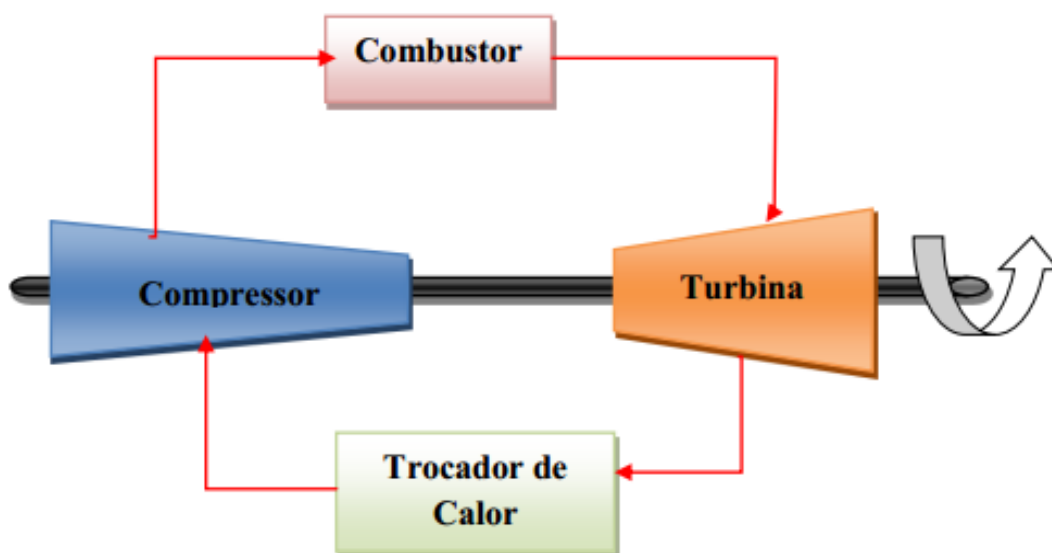


FIGURA 2 – Modelo de ciclo Brayton
FONTE: BALESTIERI (2003)

O ar passa pelo compressor indo até câmara de combustão, onde é elevado a uma alta temperatura e a uma pressão elevada com esta alta pressão passa por turbinas acionando máquinas e geradores.

O Ciclo Combinado (Figura 3) mais utilizado no momento é o que acopla turbinas com caldeiras de recuperação e turbinas a vapor, ainda que possa admitir outros geradores. Possui um rendimento maior, por utilizar 2 tipos de geração. Rendimento global de 90%. Onde 38% são obtido pela turbina gás e 52% por turbina a vapor.

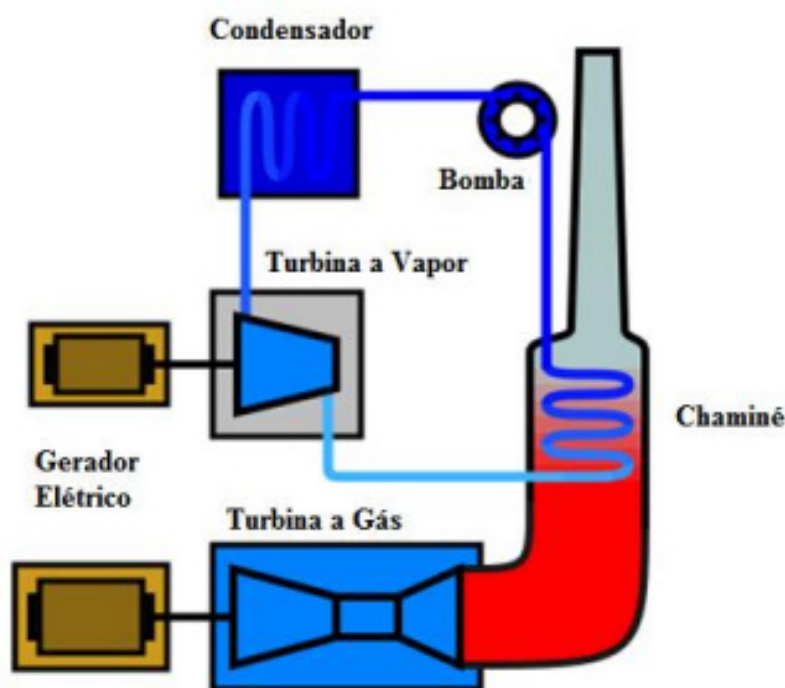


FIGURA 3 – Modelo de ciclo Brayton
FONTE: BALESTIERI (2003)

Para escolher o ciclo certo que deverá compor o sistema de co-geração deve-se levar em consideração:

- Atendimento das demandas operacionais da planta de processo;
- Eficiência e confiabilidade;
- Geração de excedentes (poderão ser negociados ou não para venda).

Após definir as características da planta de processo e co-geração, é necessário que se faça a conexão entre o sistema de geração e o centro de consumo. Além de ajustar os níveis de atendimento tais como: quantidade que será comercializada, os períodos e as condições.

2.3 POTENCIAIS DOS SETORES INDUSTRIAIS

Os principais setores que apresentam maiores potenciais de aplicação da co-geração são os do Açúcar e Álcool, Papel e Celulose.

2.3.1 Co-geração na Indústria Sucroalcooleira

Hoje no Brasil existem mais de 450 usinas sucroalcooleiras operando. Em termos energéticos, a safra de 2009 foi equivalente a ($65,4 \times 10^6$ toneladas equivalentes de Petróleo), mais da metade de todo o óleo e gás consumidos no país (SOUZA, 2003).

Uma usina que processa $2,0 \times 10^6$ de toneladas de cana por ano e que necessita 24GWH/ano para atender suas necessidades próprias pode gerar até 324GWH/ano através da utilização de seus resíduos como fonte de energia em caldeiras.

Estudos mostram que, embora os parâmetros econômicos variem muito de usina para usina, a energia elétrica por elas produzida é competitiva com a gerada em centrais a gás. As usinas têm como um fator importante a localização próxima às cargas, propiciando redução de custos de transmissão de distribuição (SOUZA, 2003).

Muitas usinas ainda podem gerar no período de estiagem, sendo um complemento perfeito ao regime das hidrelétricas instaladas. As vantagens de se usarem os resíduos da cana como fonte de energia primária para geração de

eletricidade são muitas e afetam positivamente diversos grupos de interesses, tanto a nível micro quanto macroeconômico.

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

2.3.2 Cogeração na Indústria de Papel e Celulose

O setor de celulose e papel no Brasil tem por base o Processo Kraft (processo de obtenção da celulose que é iniciado com o descascamento e lavagem de toras de eucalipto selecionadas para posterior picagem. Com isto são produzidos cavacos de dimensões uniformes que são encaminhados ao cozimento, após um processo de peneiramento), que deve corresponder a 95% do total das empresas, segundo relatórios da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP). Esse processo tem por vantagem o grande potencial de recuperação dos produtos empregados na produção do papel, assim como o aproveitamento de subprodutos (SOUZA, 2003). É um dos segmentos industriais com maior consumo de energia, tendo comprado em 1997 mais de 10000 GWh de eletricidade, 8% do consumo no setor industrial (BEN, 2010).

A auto produção no setor de papel e celulose ainda é baixa: apenas 30% das indústrias possuem geração própria. Segundo a Eletrobrás o potencial técnico

de geração de eletricidade nestas indústrias foi em 2003 de 1740 MW instalados (BEN, 2010).

Nas indústrias de papel, o consumo se concentra principalmente no licor negro, fluido processual, produzido pela própria empresa. A geração de energia é efetuada através desse combustível e em alguns casos a partir de gás natural de bacias de gás (BEN, 2010).

Do ponto de vista técnico, o setor usa geradores de vapor acoplados a turbinas a vapor, o vapor gerado a alta pressão em caldeiras é expandido em turbinas para utilização em processo.

2.3.3 Co-geração no Setor Terciário

Para que seja um potencial utilizador do sistema de co-geração é necessário que o setor atenda a algumas características, tais como:

- Necessidade simultânea e contínua de energia térmica e elétrica;
- Disponibilidade de combustíveis de qualidade;
- Período de funcionamento de pelo menos 4500-5000 horas por ano;
- Espaço suficiente e uma adequada localização para implementação

do novo equipamento;

- Calor residual disponível de elevada qualidade.

Tais características são encontradas com muita frequência na indústria. Todavia, não é verificada uma relação muito estreita entre o consumo de energia e o tipo de atividade realizada. Os principais usos de energia térmica são para aquecimento, ventilação e ar condicionado (FERNANDES, 2003).

Um sistema bem projetado e adequado traz muitos benefícios. Os principais são:

- Economia de energia primária;

- Redução de emissões poluentes;
- Benefícios econômicos.

2.4 TECNOLOGIAS DE CO-GERAÇÃO

Na geração de energia são utilizados equipamentos de um ou mais dos ciclos apresentados; para uma análise criteriosa do projeto e da operação de centrais de co-geração é importante se ter o entendimento de seu funcionamento e o conhecimento das características operacionais de cada um.

2.4.1 Caldeiras

Caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos que permitem a geração de formas de energia térmica de amplo uso, tanto para uso industrial quanto para uso comercial ou residencial. Pode-se usá-las em muitas aplicações, como secagem, geração de energia, cozimento, lavagem de utensílios, desinfecção, aquecimento ambiental, dentre outros.

Equipamentos geradores de vapor convencionais e de recuperação devem estar disponíveis (BALESTIERI, 2003).

Caldeiras convencionais: São constituídas por dispositivos destinados à produção de vapor ou água quente em pressões elevadas, proporcionada por calor liberado da queima de um combustível. A Figura 4 descreve uma caldeira convencional.

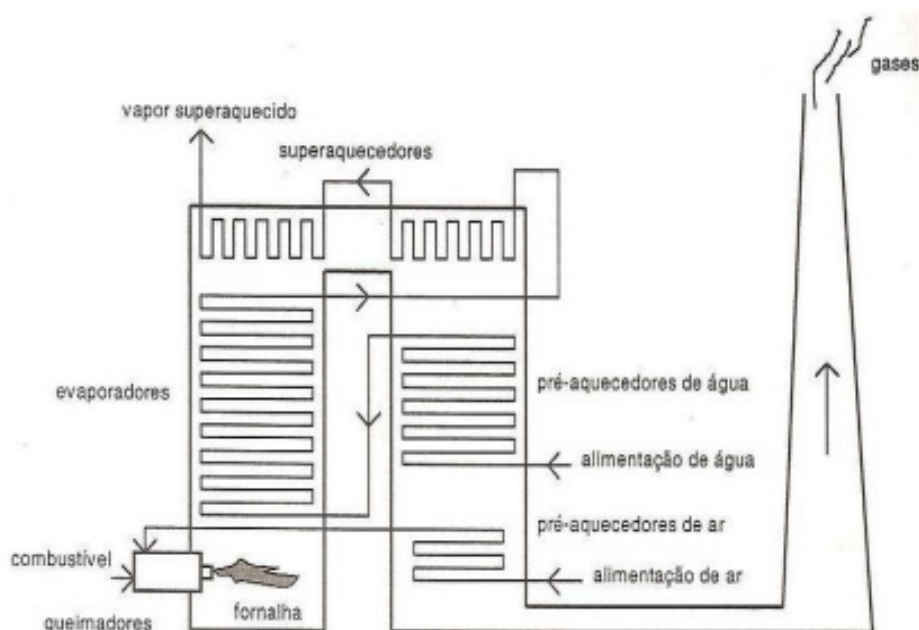


FIGURA 4 – INSTALAÇÃO DE CALDEIRA CONVENCIONAL
 FONTE: BALESTIERI (2003)

A instalação de caldeiras é descrita (figura 4) pelo conjunto formado pelo equipamento gerador de vapor e seus acessórios (sopradores de ar, bomba, chaminés, queimadores, etc.). As caldeiras aquatubulares, que permitem a troca térmica entre os gases de combustão, que passam pelo casco da caldeira, e água, que passa no interior dos tubos, para a geração de vapor, são usadas geralmente em indústrias. Este sistema de troca térmica permite um nível maior de vapor (igual ou superior a 28 Mega Pascal (MPa)) (BALESTIERI, 2003).

As caldeiras flamo tubulares, que apresentam os gases de combustão internos aos tubos, só permitem pressões inferiores a 1,7 MPa, o que deixa inviável seu uso para a co-geração. Os combustíveis usados nas caldeiras são: óleo, gases diversos, carvão e resíduos (para esses dois últimos utilizam-se grelhas para o assentamento). Queimadores dotados de atomizador, que regulam a vazão ar/combustível em níveis ótimos de queima são utilizados para a queima de óleo (BALESTIERI, 2003).

Caldeira de recuperação (Figura 5): utilizada para aproveitar o calor dos gases de exaustão, produzindo assim vapor por troca térmica. Pode ser utilizada também na fabricação de ácido sulfúrico:

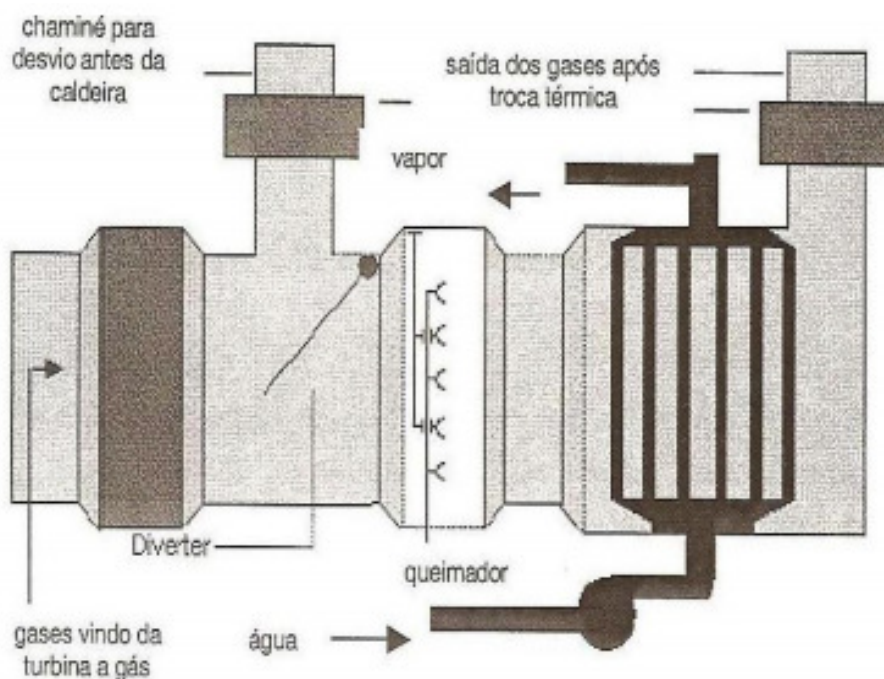


FIGURA 5 – INSTALAÇÃO DE CALDEIRA CONVENCIONAL
 FONTE: JUNIOR (2001)

2.4.2 Turbinas a gás

A turbina a gás (Figura 6) é uma combinação, geralmente de construção compacta, composta de compressor, câmara de combustão e turbina. O ar entra no compressor e passa para a câmara de combustão, onde o combustível é queimado continuamente sob pressão constante. Os gases aquecidos são expandidos na turbina, que aciona o compressor e gera potência para um gerador (BALESTIERI, 2003).

Dependendo do tipo de tecnologia utilizados terá um curto tempo para partida e um baixo custo de investimento, tornando-as ideais para atendimento a picos de carga.

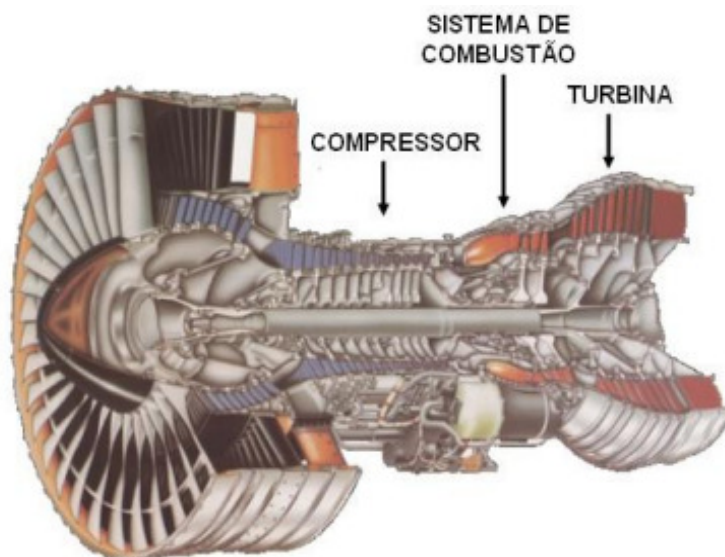


FIGURA 6 – TURBINA A GÁS
FONTE: EDUCOGEM (2001)

Tal como todos os sistemas, segundo Educogen (2001), o uso da turbina a gás tem vantagens e desvantagens, das quais se destacam as seguintes:

Vantagens:

- Manutenção simples (menores tempos de paragem);
- Elevada fiabilidade;
- Baixa poluição ambiental;
- Não necessita de vigilância permanente;
- Disponibiliza energia térmica a temperaturas elevadas (500^o a 600^o);
- Unidades compactas e de pequeno peso;
- Arranque rápido;
- Baixo nível de vibrações.

Desvantagens:

- Limitado o nível de variedade de combustível consumido;
- Tempo de vida útil curto;

- Ineficácia em processos com poucas necessidades térmicas;
- Necessidade de uso de dispositivos anti-poeiras/sujidade, anti-corrosão (em especial em casos de pausas de funcionamento prolongado).

2.4.3 Turbinas a vapor

Operadas com vapor de alta pressão na condição superaquecida, as turbinas a vapor são turbo máquinas. Podem ser classificadas, dependendo do seu uso, em:

Turbinas de contrapressão pura (Figura 7): fornecem integralmente a mesma vazão de vapor recebida para os trocadores de calor situados a jusante da turbina, submetendo-o a uma expansão desde a condição inicial (de alta pressão) até níveis de pressão da ordem de 0,2 a 1,0 MPa;

Turbinas de condensação e extração (Figura 7): recebem o vapor de alta pressão e de um ou mais pontos extrai-se vapor de processo com pressão pré-fixada conforme necessidade da unidade.

As turbinas de contrapressão são recomendadas nos processos industriais nos quais a demanda por calor de processo é igual à demanda por energia eletromecânica. As turbinas de condensação e extração são aplicadas nos processos em que a produção de energia elétrica/mecânica é prioritária (BALESTIERI, 2003).

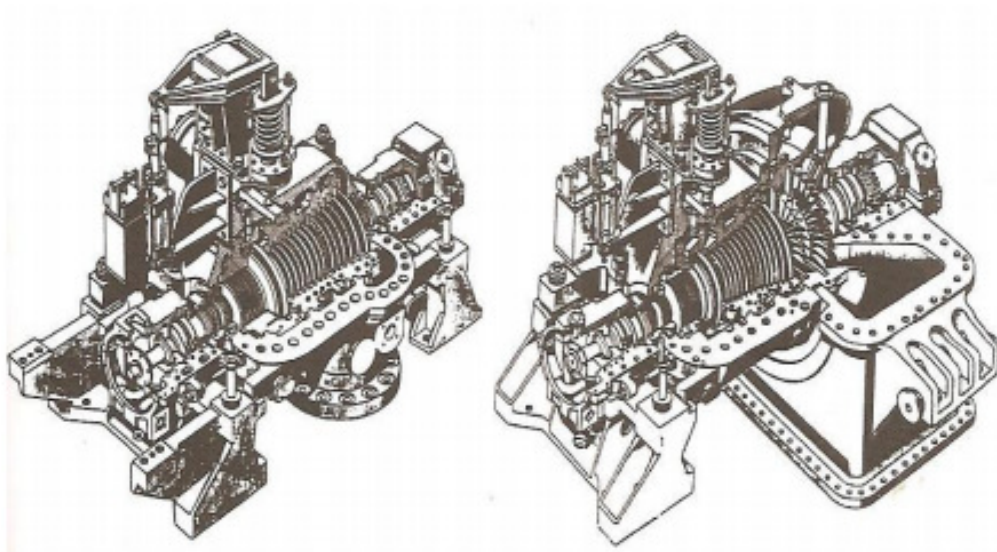


FIGURA 7 – TURBINAS A VAPOR: (CONTRAPRESSÃO) (CONDENSAÇÃO)
FONTE: JUNIOR (2001)

De acordo com Educogen (2001), são discriminadas, as principais vantagens e desvantagens da Co-geração com Turbinas a Vapor são:

Vantagens:

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

Desvantagens:

- Baixo rendimento elétrico;
- Arranque lento;
- Problemas de controle de emissão de poluentes;

- Dependência de um tipo de combustível no dimensionamento, ou seja, só pode usar o combustível idêntico aquele para que foi projetado o sistema;
- Reduzido número de aplicações;
- Investimento inicial elevado;
- Baixo rendimento elétrico.

2.4.4 Motores de Combustão Interna

Dentre eles, assumem um papel de destaque na co-geração os motores Diesel, máquinas térmicas de êmbolos, em cujos cilindros têm lugar a queima de um combustível e por conseqüência a transformação de calor em potencia de baixo eixo que, em unidades estacionárias, varia no amplo leque de 20 a 25000 kW.

Motores de combustão interna podem operar em ciclos de dois ou quatro tempos; no ciclo de quatro tempos, ocorre admissão da mistura combustível (primeiro tempo), compressão da mistura (segundo tempo), explosão, expansão dos produtos de combustão e escape (terceiro tempo) e expulsão dos produtos de combustão (quarto tempo). No ciclo de dois tempos, o primeiro tempo compreende a admissão da mistura e a compressão, e no segundo tempo ocorrem a combustão, a expansão e o escape (BALESTIERI, 2003).

Os motores diesel apresentam por distinção dos demais motores de combustão interna o fato de receberem o combustível através de injetores; nos cilindros do motor se comprime ar puro e, ao final da compressão, injeta-se neles o combustível que, em meio ao ar quente, inflama-se e queima em pressão constante.

2.5 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA CO-GERAÇÃO

Os principais combustíveis utilizados para co-geração são:

- Gás Natural;
- Óleo Diesel;

- Bagaço de Cana;
- Briquete;
- Biomassa.

2.6 ASPECTOS GERAIS

Para se entender o conceito de calor, precisa-se primeiro falar sobre a energia contida em um sistema físico. Energia física está associada ao movimento das partículas que compõem o sistema. Energia de ligação está associada à “ligação” entre as partículas do sistema. Energia interna é a soma de todas as energias do sistema, cinética, de ligação química, nuclear, etc. Depende da temperatura, estado físico e da quantidade de matéria (ETAPA, 2010).

Os conceitos de temperatura e calor são frequentemente confundidos na linguagem cotidiana. No entanto, do ponto de vista físico, são dois conceitos distintos (ETAPA, 2010).

2.6.1 Temperatura

A temperatura de um corpo está relacionada à energia cinética de suas moléculas. Assim, podemos alterar a temperatura de um corpo fornecendo ou retirando energia de movimento de suas moléculas. Isso pode ser conseguido de formas mecânicas: choques, atrito, agitação ou por meio de troca de calor (ETAPA, 2010).

Quando dois corpos, a diferentes temperaturas e isolados do meio exterior, colocados em contato, acabam por atingir um estado no qual suas temperaturas se igualam. Logo, se houve alteração nas temperaturas de ambos, entre eles ocorreu troca de energia. A essa energia trocada devido à diferença de temperatura chamamos calor (ETAPA, 2010).

2.6.2 Calor

Calor passa espontaneamente do corpo de temperatura maior (maior energia cinética) para o de menor temperatura (menor energia cinética) (ETAPA, 2010). Calor é energia em trânsito, logo suas unidades são as de energia. No Sistema Internacional é o Joule (J). Existe uma unidade especial, a caloria, definida como a quantidade de calor necessária para elevar de 14,5°C para 15,5°C a temperatura de 1 g de água, sob pressão de 1 atm. Uma caloria equivale a 4,1868 joules (J) (ETAPA, 2010).

2.6.3 Calor Específico

Com relação à energia interna de agitação térmica, é fácil observar que quanto maior a quantidade de calor trocada por um corpo, maior será sua variação de temperatura. Assim, a quantidade de calor (Q) e a variação de temperatura ($\Delta\theta$) são diretamente proporcionais (ETAPA, 2010). Assim tem-se:

$$Q = C.\Delta\theta \text{ em que}$$

$$\Delta\theta = \theta_{\text{final}} - \theta_{\text{inicial}}$$

A constante de proporcionalidade C é chamada de capacidade térmica do corpo. Ela mede a quantidade de calor necessária para que o corpo sofra uma variação unitária de temperatura (ETAPA, 2010). Para Q medido em caloria (cal) e $\Delta\theta$ em grau Celsius (°C), a unidade de C será caloria por grau Celsius (cal/°C) (ETAPA, 2010).

Por outro lado, se dois corpos de mesmo material sofrem a mesma variação de temperatura, o de maior massa troca uma quantidade de calor maior, portanto (Q) é diretamente proporcional à massa (m):

$$Q = m.c.\Delta\theta$$

A nova constante de proporcionalidade C é chamada de calor específico da substância que compõe o corpo. Ela mede a quantidade de calor necessária para que uma unidade de massa sofra uma variação unitária de temperatura (ETAPA, 2010).

Dependendo das condições de temperatura e pressão, a matéria pode apresentar-se em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso (ETAPA, 2010).

2.6.4 Calor Latente

Pode-se fazer um sistema mudar de estado físico adicionando ou retirando calor. A quantidade de calor (Q) trocada por um sistema em uma mudança de estado é diretamente proporcional à massa m que muda de estado. Então:

$Q=m.L$. A constante de proporcionalidade L , calor latente da transformação, é medida em unidade de energia por unidade de massa caloria por grama (cal/g). Se a mudança de estado ocorre à pressão constante, a temperatura permanece constante e é característica para cada pressão (ETAPA, 2010).

2.6.5 Poder Calorífico

A qualidade do bagaço para fins energéticos pode ser medida através do “Poder Calorífico”, ou seja, a quantidade de energia liberada na combustão completa de um combustível, sendo que todos os produtos da combustão são relacionados às condições normais de temperatura e pressão (CNTF), com temperatura a zero °C e pressão de 1,0 atm (absoluta).

O poder calorífico para combustíveis sólidos pode ser expresso por diversas unidades de medida, sendo internacionalmente aceita em quilo Joule por quilograma (kJ/kg), ou em megaJoule por quilograma (MJ/kg). Normalmente, o setor sucroalcooleiro utiliza a unidade quilocalorias por quilograma (kcal/kg), sendo que 1,0 kcal/kg corresponde a 4,185 kJ/kg (ETAPA, 2010).

O poder calorífico do bagaço pode variar em função de diversas condições, como a composição da matéria-prima entre locais e ao longo da safra, ou seja, variedade, estágio de maturação, idade, sistema de colheita, quantidades de impurezas vegetais e minerais, e das condições de trabalho, como nível de preparo da cana, sistema de extração do caldo (moenda ou difusor) e embebição. Entretanto, até o momento não foram detectadas diferenças significativas com relação ao “poder calorífico superior” (PCS) entre variedades, estágios de corte, bagaço proveniente de cana inteira ou cana picada, áreas com e sem aplicação de vinhaça ou de áreas onde a cana recebe aplicação de maturadores químicos. Essa conclusão já havia sido comprovada em estudos similares na África do Sul (CTC, 2010).

2.6.6 Poder Calorífico Superior

Denomina-se “Poder Calorífico Superior” (PCS) quando se considera o calor latente de vaporização da água formada pela reação de combustão durante a queima do combustível com o ar seco. Neste caso, a água gerada nos produtos da combustão é retirada na forma líquida a temperatura ambiente. O PCS pode ser medido precisamente utilizando uma bomba calorimétrica a volume constante para combustíveis líquidos ou sólidos (ex. bagaço e palha de cana). Ex.: PCS bagaço (umidade=50%) = 9,1 MJ/kg (2170 kcal/kg) (CTC, 2010)

2.6.7 Poder Calorífico Inferior

O “Poder Calorífico Inferior” (PCI) é o resultado do PCS menos o calor latente formado pela água durante a combustão. Neste caso, considera-se a água gerada pelos produtos de combustão na forma de vapor. Em instalações industriais, a temperatura dos gases de saída em processos de combustão é maior que a temperatura de condensação da água na pressão atuante. Assim sendo, o PCI tem

maior aplicação prática no dimensionamento e avaliação de equipamentos (CTC, 2010).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa tem caráter exploratório baseado em pesquisas bibliográficas de forma a desenvolver o trabalho dentro do tema proposto e no estudo de caso.

Será apresentado o estudo de caso a respeito da situação da empresa Aperam Bioenergia a nível operacional, com o objetivo de ilustrar o que foi apresentado ao longo do trabalho.

A Aperam Bioenergia, é uma empresa do setor florestal, situando seu escopo de trabalho no Vale do Jequitinhonha, possuindo 126.000 hectares onde que destes 76.000 hectares é destinado à áreas de reflorestamento a partir de clones de eucaliptos. O sistema de produção de carvão da Aperam é uma associação de atividades com técnicas atualizadas e com um potencial de mecanização das atividades altíssimo. Sua produção anual é aproximadamente 450.000 toneladas de carvão, por volta de 1.800.000 m³.

A partir do estudo do processo de carbonização foram obtidos os valores do balanço energético dos fornos que serão apresentados nos resultados e discussões.

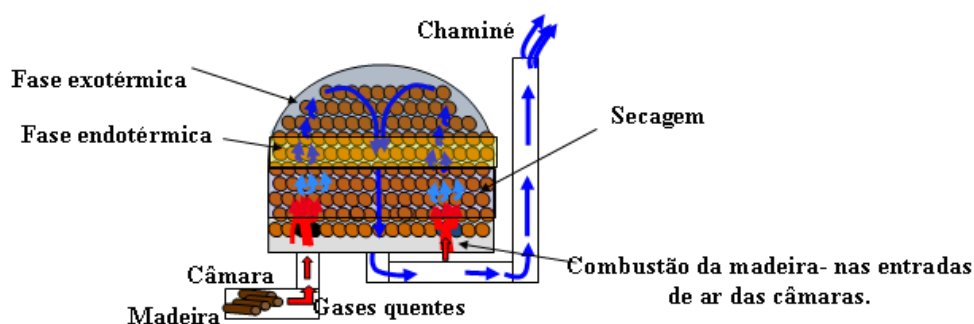


FIGURA 8 – BALANÇO ENERGÉTICO FORNO RAC-700
 FONTE: APERAM BIOENERGIA (2012)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de produção de carvão é feito a partir de fornos de alvenarias com capacidade produtiva de 192 toneladas de carvão por mês por forno, a este forno dar-se o nome de RAC-700. Para estes fornos, seu sistema produtivo é totalmente mecanizado, carga dos fornos, descarga dos fornos, e expedição do carvão.

A Aperam desenvolve estudos há aproximadamente 40 anos no melhoramento florestal, e 25 anos no estudo da queima dos gases gerados no processo de carbonização, e seu aproveitamento como fonte de energia.

Através de estudo realizado pela empresa, durante o processo de carbonização temos o balanço energético descrito na Tabela 1.

Demanda de energia no processo de carbonização			
	Demanda	%	Oferta
Secagem	257	49	18
Carbonização fase endotérmica	98	19	261
Carbonização fase exotérmica	138	26	1193
Fixação	35	7	139
Soma	528	100	1611
Saldo	1083 Mcal/t_{madeira}		

Consumo madeira para carbonização em um forno RAC700 - 4 a 6t/ciclo (1 a 2% carga)

Tabela 1: Balanço energético forno Rac-700
Fonte: APERAM BIOENERGIA(2012)

Desta forma com tamanha possibilidade de aproveitamento desta fonte energética, a Aperam Bioenergia criou, com tecnologia própria, um sistema associado para queima de gás, este sistema consiste em canalizar os gases gerados na carbonização para uma célula de queima (fornalha) queimando os mesmos. Esta queima é feita com cada célula interligada a 12 fornos, desta maneira é feita a descarga intercalada deste conjunto de forno, descarregando dois fornos

deste conjunto a cada três dias, mantendo assim a célula sempre acesa e em alta temperatura. A temperatura de trabalho desta célula oscila de 900°C à 1300°C.

Com tal quantidade de calor, a Aperam Bioenergia esta em fase de associação do sistema utilizando o calor proveniente da queima dos gases para efetuar a secagem forçada da madeira e para produção de energia elétrica através da co-geração por meio de uma termoelétrica.

4.1 SISTEMA DE CO-GERAÇÃO

Pelo formato das Unidades de Produção de Energia (UPE's), e correlacionando com balanço energético acima citado cada planta tem capacidade de produzir aproximadamente 6MW.

Para geração de energia a partir do calor gerado nas células o calor será canalizado para aquecer uma Caldeira Aquatubular, onde será acoplado a uma Turbina de Condensação de 2MW de capacidade de produção, para cada planta teremos três células e três turbinas, como há seis plantas de carbonização, totaliza 36MW de produção total da Aperam Bioenergia.

Para que no processo de co-geração não ocorra oscilação na produção de energia, diminuindo assim seu valor agregado, foi feito um levantamento quanto as concentrações dos gases, chegando aos valores médios citados abaixo.

4.2 BALANÇOS DE GASES

Com o objetivo de quantificar as emissões, os gases de exaustão das carbonizações foram periodicamente coletados e, na sua fração não condensável (CH₄, CO₂, CO, N₂, O₂ e H₂), imediatamente analisados no local, por cromatografia gasosa. Ao mesmo tempo, amostras da fração condensável (licor pirolenhoso e alcatrão) foram coletadas e quantificadas. A amostragem foi realizada nas chaminés

dos fornos durante todo o ciclo de carbonização, e temos os resultados apresentados na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4

BALANÇO MADEIRA/CARVÃO			
ENTRADA		SAÍDA	
Madeira enfiada (kg)	327.650,00	Carvão (kg)	84.160,00
Resto de casca (kg)	0,00		
Atiço enfiado (kg)	9.060,00	Atiço produzido (kg)	21.640,00
Umidade da madeira (b/s) (%)	15,70	Umidade do carvão (b/s) (%)	4,51

Tabela 2- Relação madeira carvão forno Rac-700
Fonte: LQCE SP (2013)

Componentes do balanço de massa da carbonização	Massas envolvidas na carbonização (kg)
Ar	459.089
Pirolenhoso bruto	157.109
Água livre da madeira	40.083
GC	117.025
GNC	84.016
Carvão	80.528

Tabela 3- Balanço de massa forno Rac-700
Fonte: LQCE SP (2013)

MC_{GNC}*	3,58 kg
MC_{GC}	1,0350 kg
K_{FU}	0,2893 kg/kg
P_{H2}	0,0009 kg _{H2} /kg gás
P_{O2}	0,1710 kg _{O2} /kg gás
P_{N2}	0,6506 kg _{N2} /kg gás
P_{CO2}	0,1246 kg _{CO2} /kg gás
P_{CO}	0,0473 kg _{CO} /kg gás
P_{CH4}	0,0056 kg _{CH4} /kg gás
M_{GNC}	543.104 kg_{GNC} /corrida
M_{H2}	514 kg _{H2} /corrida
M_{O2}	92.869 kg _{O2} /corrida
M_{N2}	353.319 kg _{N2} /corrida
M_{CO2}	67.653 kg _{CO2} /corrida
M_{CO}	25.690 kg _{CO} /corrida
M_{CH4}	3.060 kg _{CH4} /corrida
V_{GNC}	412.661 m³_{GNC} /corrida
V_{H2}	390 m ³ _{H2} /corrida
V_{O2}	70.563 m ³ _{O2} /corrida
V_{N2}	268.459 m ³ _{N2} /corrida
V_{CO2}	51.404 m ³ _{CO2} /corrida
V_{CO}	19.519 m ³ _{CO} /corrida
V_{CH4}	2.325 m ³ _{CH4} /corrida

Tabela 4- Concentração de gases na carbonização forno Rac-700
Fonte: LQCE SP (2013)

Foi visto que no processo de carbonização há uma oscilação nas concentrações e volumes dos gases combustíveis gerados, para manter as mesmas concentrações de gás na célula durante todo período de queima, as descargas dos fornos devem seguir a escala citada abaixo, mantendo um ciclo contínuo.

5. CONCLUSÕES

Ao revisar a bibliografia, foi possível detectar as diversas formas tecnológicas existentes para a geração de energia através do sistema de co-geração, bem como foi possível também detectar o potencial existente neste seguimento.

Com relação à produção de energia a partir dos gases provenientes da carbonização da madeira, pode ser visto que o potencial energético do setor é muito grande, porém o mesmo se encontra no estágio inicial de desenvolvimento. Necessitando de tempo e maiores investimento para se concretizar,

Quanto à Aperam Bioenergia, a mesma inicia um sistema promissor de grande porte, havendo um desenvolvimento associado teórico/empírico por parte da empresa que levou à uma mudança de patamar nos últimos anos, podendo então vislumbrar para um futuro próximo a produção de energia.

Para este setor o maior desafio é associar produção, recolhimento do gás e queima do gás, pois a partir do ponto que se inicia a geração de energia propriamente dita já existe tecnologias consistentes no mercado. A Aperam Bioenergia, com seu novo conceito de sincronismo de 12 fornos e com seu novo sistema de célula de queima (fornalha) traz um novo conceito que poderá ser ampliado, diminuindo assim os problemas existentes quanto ao recolhimento do gás e queima do mesmo, com isto o seguimento florestal de produção de carvão mudará seu conceito e terá um novo produto a ser explorado e comercializado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALESTIERI, J. A. P. Co-geração: geração combinada de eletricidade e calor. Florianópolis-SC: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

BEN. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <www.ben.epe.gov.br>. Acesso em: 10 jul. 2010.

CTC. Metodologias de Laboratório. Disponível em: <www.ctc.com.br>. Acesso em: 29 ago. 2010.

ETAPA. Termodinâmica 1, 2 e 3. Disponível em: <www.etapa.com.br>. Acesso em: 10 set. 2010.

FERNANDES, A. C. Cálculos na Agroindústria da cana-de-açúcar. Piracicaba: STAB, 2003.

LINERO, F. A. B. Geração de vapor, uma visão geral. CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), Mar. 2006.

LORA, E. E. S; NASCIMENTO, M. A. R. Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação. 2. ed. São Paulo: Interciência, 2004.

M.M.E. Ministério de Minas e Energia. Disponível em <www.mme.gov.br> Acesso em: 02 nov. 2010.

PAINEL FLORESTAL. Disponível em <www.painelflorestal.com.br>. Acesso em: 05 ago. 2010.

SOUZA, Z. J. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação. 2003, 163f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção). Departamento da Engenharia da produção- UFSCAR - São Carlos, SP. 56

ODDONE, D. C. Cogeração: uma alternativa para produção de eletricidade. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

EDUCOGEN, Educogen – The European Educational Tool on Cogeneration, 2001.

LQCE, Estudo sobre emissão de gases de efeito estufa em processos de produção de carvão vegetal em fornos Rac700 – Piracicaba, SP 2013.

APERAM BIOENERGIA, Projetos queimadores de gases provenientes de carbonização, fevereiro 2012.

APERAM BIOENERGIA, Sistema de secagem de madeira, maio 2013.