

RONALDO GOMES DORTA DE SOUZA

**ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DE COGERAÇÃO RENOVÁVEL
NA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

São Paulo – SP
2019

RONALDO GOMES DORTA DE SOUZA

**ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DE COGERAÇÃO RENOVÁVEL
NA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Msc. Ronaldo Andreos

São Paulo – SP
2019

Ficha catalográfica (anexar aqui)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Moacir Dorta de Souza, Sonia Gomes Sá Dorta de Souza e minha irmã Vanessa Gomes Dorta de Souza por sempre estarem ao meu lado me incentivando a extrair o melhor de mim.

Ao Prof. Msc. Ronaldo Andreos pela orientação e amizade.

Aos amigos que fiz durante o curso.

RESUMO

Indústrias do setor de papel e celulose possuem altos consumos de energia elétrica nos seus processos, aumentando a necessidade de um melhor aproveitamento energético em todas fases da indústria. Geralmente, faz-se necessário a compra de uma caldeira de força para combustão da biomassa residual do processo de obtenção de celulose e fornecer vapor superaquecido a uma turbina a vapor e assim obter a energia para a planta. No intuito de se obter uma melhor eficiência energética, é possível gaseificar a biomassa e direcioná-la diretamente a uma turbina a gás síntese.

A tecnologia de gaseificação da biomassa precisa de aprimoramentos no intuito de melhorar a confiabilidade de obtenção de um gás síntese com poder calorífico e vazões mais constantes. Esses fatos devem ser monitorados constantemente para que a viabilidade econômica da usina seja favorável.

ABSTRACT

Paper and pulp industries have high electricity consumption in their processes, increasing the need for better energy use in all phases of the industry. Generally, it is necessary to purchase a power boiler for combustion of the residual biomass from the pulp production process and to supply superheated steam to a steam turbine and obtain the energy. In order to achieve better energy efficiency, it is possible to gasify the biomass and direct it directly to a synthesis gas turbine.

Biomass gasification technology needs improvements in order to improve the reliability of obtaining a synthesis gas with calorific power and more constant flow rates. These facts must be constantly monitored so that the economic viability of the plant is favorable.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|--------------|
| Figura 1.1 Matriz Energetica de Industrias de Papel e Celulose - Fonte primaria (EPE, 2018)..... | 15 |
| Figura 1.2 Matriz Energética de Indústrias de Papel e Celulose - Fonte secundária (EPE, 2018) | 15 |
| Figura 2.1 Diagrama esquemático ciclo combinado (topping e bottoming) Fonte: Cunha 2000..... | 20 |
| Figura 2.2 Ciclo Brayton, Fonte: Gas turbine engineering..... | 21 |
| Figura 2.3 Ciclo combinado (Brayton e Rankine), Fonte: Gas turbine engineering..... | 21 |
| Figura 2.4 Ciclo Rankine, Fonte: Çengel..... | 23 |
| Figura 3.1 Tecnologias de conversão termoquímicas, Fonte: The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing | 25 |
| Figura 3.2 Gaseificador contracorrente, tipo Lurgi. Fonte Wikipedia | Erro! |
| Indicador não definido. | |
| Figura 3.3 Balanço de massa de um Gaseificador..... | 29 |
| Figura 5.1 Fluxograma da Planta de Cogeração do estudo | 34 |
| Figura 5.2 Gráfico do Valor Presente x anos..... | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Perdas de energia em plantas de ciclo combinado | 22 |
| Tabela 2.2 - Adaptado de Gas Turbine Engineering | 22 |
| Tabela 5.1 - Composição química da casca de Eucalipto | 35 |
| Tabela 5.2 – Comp. química dos gás combustível formado no gaseificador ... | 35 |
| Tabela 5.3 - Cálculo da Produção de casca de eucalipto | 36 |
| Tabela 5.4 - Cálculo do PCI da casca de eucalipto | 37 |
| Tabela 5.5 - Cálculo da vazão de combustível produzido pelo gaseificador | 37 |
| Tabela 5.6 - Composição química do gás síntese..... | 37 |
| Tabela 5.7 - Cálculo da eficiência a frio do gaseificador | 38 |
| Tabela 5.8 - Turbinas a gás síntese e a gás natural | 38 |
| Tabela 5.9 - Cálculo do vapor produzido pela caldeira de rec..... | 39 |
| Tabela 5.10 - Potência elétrica gerada pela Turbina a Vapor | 40 |
| Tabela 5.11 - Energia Produzida em um ano pelas TG | 40 |
| Tabela 5.12 - Custo da energia elétrica | 41 |
| Tabela 5.13 - Consumo anual de gás natural..... | 41 |
| Tabela 5.14 - Fatura mensal de gás natural..... | 41 |
| Tabela 5.15 - Estimativa do invest. no sist. de gaseif. com ciclos comb. | 42 |
| Tabela 5.16 - Fluxo de Caixa | 43 |
| Tabela 5.17 - Resultados da TIR e Payback..... | 43 |
| Tabela 6.1 - Certificação na Cogeração..... | 44 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

FUE – Fator de Utilização de Energia

TG – Turbina a Gás

TV – Turbina a Vapor

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

H₂ – Hidrogênio

CH₄ – Metano

IMA – Incremento Médio Anual

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

TIR – Taxa Interna de Retorno

VPL – Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|---|
| \dot{W} | Potência de eixo produzida pela máquina (kW) |
| \dot{Q}_u | Taxa de calor útil utilizado produzido ou recuperado (kW) |
| Φ | Razão de equivalência |
| $IMAV$ | Incremento médio anual volumétrico (m ³ /ha.ano) |
| IC | Idade da colheita (anos) |
| P_{mc} | Produção de madeira e casca na colheita (m ³ /ha) |
| $mtvc$ | Média do teor volumétrico de casca no tronco (%) |
| P_{ec} | Produção estimada de casca (m ³ /ha) |
| Ha | Área do plantio de eucalipto (Hectares, ha) |
| P_{cd} | Produção de casca diária (kg/dia) |
| E_{fd} | Eficiência do descascador (%) |
| P_{efch} | Produção de casca de eucalipto por hora (kg/h) |
| PCI_{bio} | Poder Calorífico Inferior da biomassa (MJ/kg) |
| E_d | Energia disponível na Biomassa (MJ/h) |
| Ex_{ar} | Excesso de ar |
| V_{ma} | Vazão mássica de ar (kg/h) |
| $U_{m\ bio}$ | Umidade da biomassa (%) |
| Ash | Concentração em peso (base seca) de cinzas |
| V_{amg} | Vazão mássica de água (kg/h) |
| V_{mc} | Vazão mássica de cinzas (kg/h) |
| V_c | Vazão de combustível (kg/h) |
| P_e | Potência elétrica da Turbina a gás (MWe) |
| E_{ft} | Eficiência da turbina a gás (%) |
| E_{tp} | Energia térmica produzida pela turbina a gás (MW) |
| E_{tna} | Energia térmica não aproveitada (MW) |
| E_t | Energia total fornecida pelo combustível (MW) |
| $V_{vc'}$ | Vazão de combustível máxima da turbina a gás (Nm ³ /h) |
| PCI_v | Poder calorífico inferior do gás síntese (MJ/Nm ³) |
| E_{pb} | Energia produzida pelo gás síntese (MW) |
| $\%u\ ou\ F_u$ | Percentual de utilização do equipamento ao longo do tempo (%) |
| E_{pgn} | Energia produzida pelo gás natural (MW) |

| | |
|-------------------------|--|
| <i>E_{tt}</i> | Energia térmica produzida pela turbina a gás síntese e turbina a gás natural (MW) |
| <i>P_v</i> | Pressão do vapor para turbina a vapor (barg) |
| <i>T_v</i> | Temperatura do vapor para turbina a vapor (°C) |
| <i>h_v</i> | Entalpia do vapor superaquecido em <i>P_v</i> e <i>T_v</i> (kcal/kg) |
| <i>T_a</i> | Temperatura da água de alimentação da caldeira (°C) |
| <i>h_a</i> | Entalpia da água de alimentação da caldeira (kcal/kg) |
| <i>Eff_{cr}</i> | Eficiência da caldeira de recuperação de calor (%) |
| <i>VV_n</i> | Vazão de vapor produzida pela caldeira de recuperação de calor (kg/h) |
| <i>VV_p</i> | Vazão de vapor para o processo (kg/h) |
| <i>Vv_{tv}</i> | Vazão de vapor para turbina a vapor (kg/h) |
| <i>P_{stv}</i> | Pressão de vapor na saída da turbina (barg) |
| <i>h_{vs}</i> | Entalpia do vapor na saída da turbina (kcal/kg) |
| <i>E_{ptt}</i> | Energia produzida pela turbina a vapor (MW) |
| <i>Eff_{ge}</i> | Eficiência da geração elétrica da turbina a vapor (%) |
| <i>E_{eptv}</i> | Energia elétrica produzida pela turbina a vapor (MWe) |
| <i>F_c</i> | Fator de carga de um equipamento (%) |
| <i>E_{pa}</i> | Energia produzida pela TG anual (MWh) |
| <i>E_{ptva}</i> | Energia produzida pela TV anual (MWh) |
| <i>E_{pt}</i> | Energia total produzida no ano (kWh) |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1. Objetivo, motivação e justificativas | 14 |
| 1.2. Resultados esperados | 16 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 17 |
| 2.1. Conceito de Cogeração | 17 |
| 2.1.1 Fator de Utilização de Energia | 19 |
| 2.2. Configurações básicas da Cogeração | 19 |
| 2.2.1. Classificação dos sistemas de cogeração | 19 |
| 2.2.2. Principais Tecnologias de Cogeração | 20 |
| 3. GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA NA INDÚSTRIA | 24 |
| 3.1. Aplicações de gaseificação da biomassa | 25 |
| 3.2. Tipos de Gaseificadores | 25 |
| 3.2.1 Gaseificadores contracorrente | 26 |
| 3.2.2 Gaseificadores concorrentes | 26 |
| 3.2.3 Gaseificadores de Leito Fluidizado | 27 |
| 3.3. Cálculo do Poder Calorífico Superior e Inferior da Biomassa | 28 |
| 3.4. Balanço de massa | 29 |
| 3.5. Vantagens e barreiras | 30 |
| 4. COGERAÇÃO EM INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE | 32 |
| 4.1. Tipos de Cogeração | 32 |
| 4.2. Vantagens e barreiras | 33 |
| 5. ESTUDO DE CASO COGERAÇÃO | 34 |
| 5.1. Análise técnica | 34 |
| 5.1.1 Fluxograma da Planta de Cogeração | 34 |
| 5.1.2 Biomassa | 34 |
| 5.1.3 Demandas elétricas e térmicas | 35 |
| 5.1.4 Cálculo da produção de biomassa | 36 |
| 5.1.5 Cálculo do Poder calorífico da Biomassa | 36 |
| 5.1.6 Cálculo da vazão de combustível produzido pelo gaseificador | 37 |
| 5.1.7 Cálculo da turbina a gás | 38 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 5.1.8 | Cálculos para caldeira de recuperação de calor..... | 39 |
| 5.1.9 | Cálculos para turbina a vapor..... | 39 |
| 5.2. | Análise econômica (Payback, TIR, VPL) | 40 |
| 5.2.1 | Estimativa da quantidade e custo de energia produzida em um ano..... | 40 |
| 5.2.2 | Estimativa do consumo e custo anual de gás anual..... | 41 |
| 5.2.3 | Estimativa do investimento no sistema de gaseificação com ciclos combinados..... | 41 |
| 5.2.4 | Fluxo de caixa | 42 |
| 5.2.5 | Payback | 43 |
| 6. | Certificação Qualificada | 44 |
| 7. | CONCLUSÕES..... | 45 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 47 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo, motivação e justificativas

Objetivo

O objetivo do presente trabalho é realizar um levantamento das tecnologias existentes de gaseificação para aplicação de cogeração renovável e realizar um estudo de viabilidade econômica com uma das tecnologias no intuito de verificar a sua aplicabilidade em uma indústria de papel e celulose.

Motivação e Justificativas

Na fase de preparação do eucalipto para produção de papel e celulose é realizada uma etapa denominada como descascamento do eucalipto onde toda a casca da madeira é retirada por interferir na qualidade na produção de papel e celulose. Essa casca possui valores de poder calorífico interessantes para ser utilizado como um combustível.

Segundo gráfico da figura 1.2, retirado do estudo da EPE de 2018, tendo em vista que 79,56% do uso de combustíveis consumidos pela indústria de papel e celulose são para se obter eletricidade, então é possível enxergar uma oportunidade para a biomassa de eucalipto.

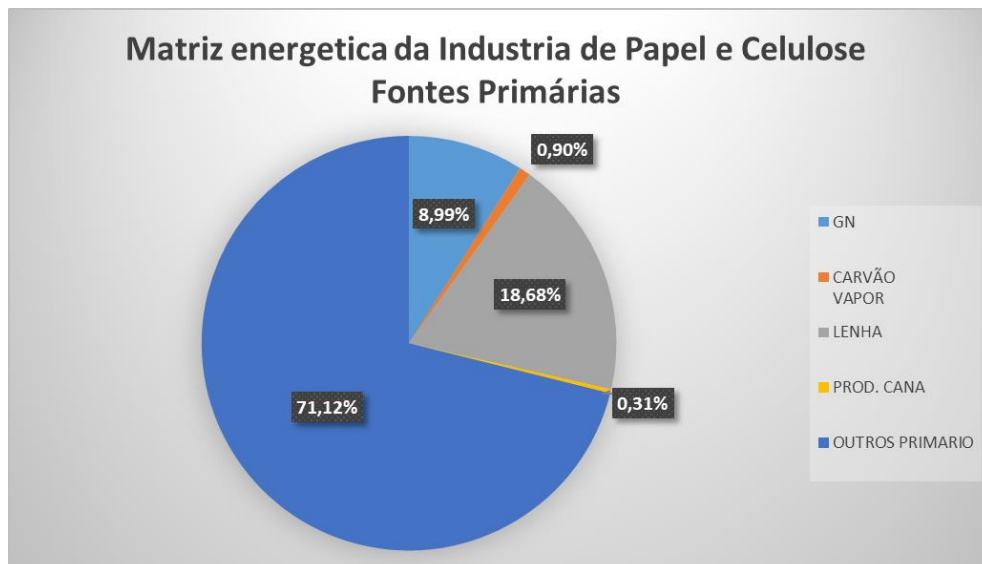


Figura 1.1 Matriz Energetica de Industrias de Papel e Celulose - Fonte primaria (EPE, 2018)

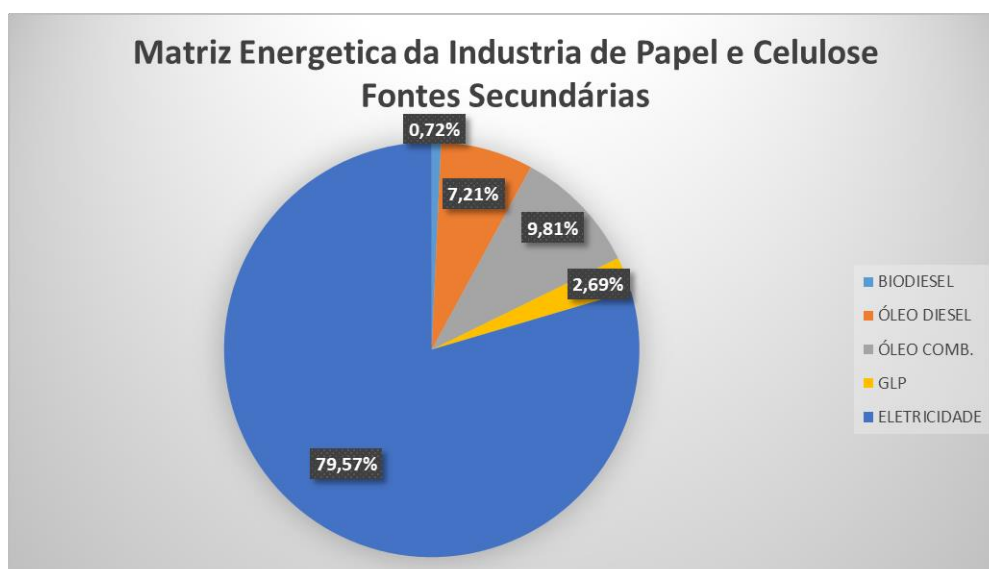


Figura 1.2 Matriz Energética de Indústrias de Papel e Celulose - Fonte secundária (EPE, 2018)

Sabe-se que muitas plantas de Papel e Celulose utilizam a biomassa de eucalipto como combustível em uma caldeira de biomassa fazendo um ciclo Rankine utilizando parte do vapor produzido no processo de produção e outra parte em uma turbina a vapor e gerar energia a própria planta.

Para se utilizar a biomassa de eucalipto é necessário de áreas consideravelmente grandes, e de infraestrutura para de manter a biomassa em graus de umidade aceitáveis para ser utilizada na combustão em caldeiras. Uma forma de se contornar esse problema é gaseificar a biomassa

e injetá-la na combustão junto com gás natural obtendo como uma vantagem adicional a flexibilidade de utilização do combustível a ser queimado.

1.2. Resultados esperados

Neste trabalho espera-se fornecer conhecimentos da tecnologia de gaseificação para realização de cogeração renovável a ser aplicada em indústrias de papel e celulose, além de se obter dados para tomada de decisão econômica para utilização dessas tecnologias.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Conceito de Cogeração

A Cogeração é uma forma eficiente de se aproveitar o máximo possível a energia produzida por um equipamento, de forma sucinta a partir de uma fonte de energia (gases, líquidos e sólidos combustíveis) com a cogeração é possível utilizar duas formas de energia útil. A ANEEL (2006) define cogeração como um processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada de calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária.

Na cogeração pode-se obter um aproveitamento de até 85% da energia contida no combustível, a qual pode ser transformada em água quente ou vapor (geração de calor), eletricidade, força motriz e água gelada (climatização) (Andreos, 2013)

A cogeração é um processo tecnológico aplicável com muito sucesso nos processos de geração elétrica a partir do ciclo a vapor. Ela pode ter também muita efetividade em sistemas combinados de geração elétrica em ciclos a vapor e a gás, operando simultaneamente. (Foelkel, 2016)

O aumento da eficiência energética global de uma usina não é o único argumento para a decisão de se implantar uma cogeração. O aumento da demanda de energia no Brasil, vem aumentando e a potência instalada de fornecimento de energia não é suficiente para atender todas indústrias brasileiras, assim é necessária a produção de sua própria energia e com a cogeração é possível encontrar oportunidades em uma planta industrial para se obter energia a partir de alguma fonte térmica que esteja sendo desperdiçada num processo. Assim, se aumenta a segurança na geração de energia, confiabilidade de fornecimento e diminuição no preço da energia, os quais são questões fundamentais para o desenvolvimento de uma nação.

Em regiões como norte e nordeste do Brasil, a cogeração pode ser uma solução em áreas que não há linhas de transmissão de energia elétrica. Além

de gerar energia, melhora a qualidade de vida dos moradores destas regiões aumentando até a expectativa econômica da região.

O modelo de projeto de uma cogeração tem que partir da ideia do que o usuário da energia tem de preferência. Uma usina pode ser projetada para operar 24 horas por dia, ou somente para redução de custos em horários de pico. O conceito do projeto muda para cada um dos casos pois os equipamentos devem ser definidos conforme a necessidade.

De forma específica, a cogeração utilizando gás natural como combustível tem como vantagem principal o fato de que não há intermitência na geração de energia visto que as concessionárias de abastecimento garantem o fornecimento.

No caso de se utilizar biomassa como combustível em plantas de papel e celulose é importante destacar que o custo do uso deste combustível é zero pelo fato dele ser um resíduo do processo de produção de papel e celulose. O projeto de cogeração para este caso tem que levar em consideração a vazão disponível de biomassa, ou se for necessário, combinar outros combustíveis e utilizá-los conforme a disponibilidade e necessidade para que a planta sempre esteja gerando energia.

Além das vantagens descritas acima, a cogeração utilizando gás natural e biomassa possui um impacto positivo na diminuição de emissões de gases do efeito estufa, sendo uma boa alternativa para geração de energia de forma limpa e eficiente.

Uma das formas de se obter melhores rendimentos energéticos e aproveitar melhor a energia primária da biomassa florestal combustível é através do processo de cogeração, que vem sendo aplicado com enorme sucesso nos sistemas de ciclo a vapor. A indústria de celulose e papel conhece muito bem essas vantagens, pois a sua geração de eletricidade e vapor a partir do licor preto é basicamente um processo bem sucedido de cogeração. (Foelkel, 2016)

2.1.1 Fator de Utilização de Energia

Centrais de geração de energia convencionais possuem fatores de utilização de energia (*FUE*) menores que centrais que utilizam cogeração. Observando a equação 2.1, pode-se concluir que aplicação de cogeração aumenta o aproveitamento do trabalho e do calor do sistema gerador de energia, assim tem-se fator de utilização maior.

Equação 2.1

$$FUE = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_u}{\dot{m} \times PCI}$$

Sendo \dot{W} a potência do eixo produzida pela máquina (kW), \dot{Q}_u a taxa de calor útil produzido ou recuperado (kW) e \dot{m} a vazão mássica de combustível (kg/s) e *PCI* o poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg) .

2.2. Configurações básicas da Cogeração

Os sistemas de cogeração de maneira geral possuem os seguintes equipamentos: turbina a gás, caldeira de recuperação de calor, turbina a vapor, transmissão de energia.

2.2.1. Classificação dos sistemas de cogeração

A classificação dos sistemas de cogeração é com base no tipo de energia que o usuário necessita. O tipo de energia pode ser térmico ou elétrico. Quando o foco de produção é energia elétrica, é utilizado o ciclo Topping, por outro lado se o foco de produção é energia térmica utiliza-se o ciclo Bottoming.

Veja na figura 2.1 que o ciclo topping possui uma turbina a gás que recebe um combustível que entra em combustão gerando energia elétrica, os gases de exaustão são conectados a uma caldeira de recuperação de calor que pode gerar vapor para um processo. O ciclo bottoming é exemplificado na figura abaixo com uma turbina a vapor recebendo o vapor de uma caldeira e transformando em energia elétrica, e vapor de baixa pressão que sai da turbina pode ser reaproveitado para a caldeira de recuperação passando por um condensador.

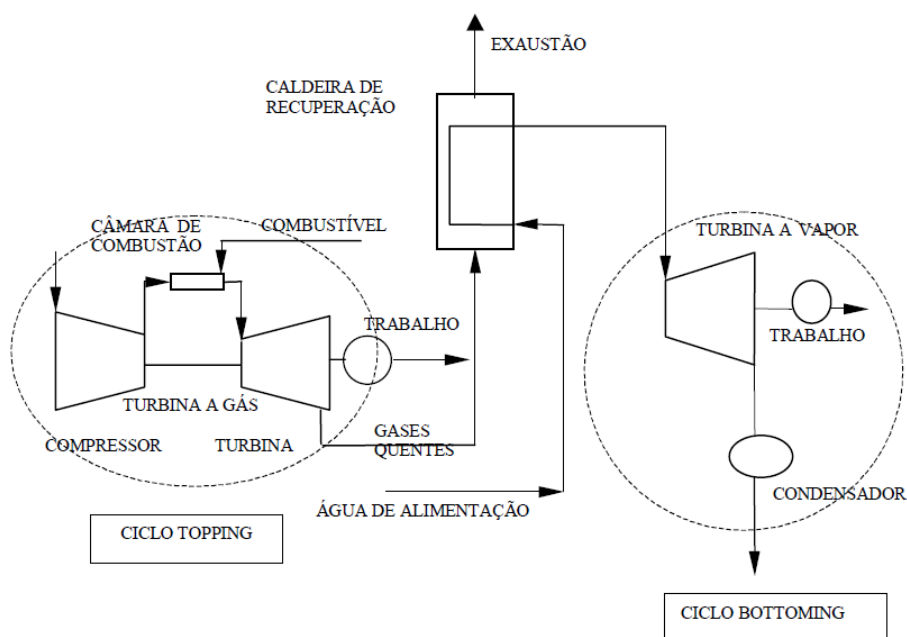


Figura 2.1 Diagrama esquemático ciclo combinado (topping e bottoming) Fonte: Cunha 2000

2.2.2. Principais Tecnologias de Cogeração

Abaixo detalhes técnicos das duas principais tecnologias a serem tratadas neste trabalho, que são Turbinas a Gás e Turbinas a vapor. No entanto existem outras tecnologias, como motores de combustão interna, as micro turbinas, motores stirling, células de combustível e ciclo orgânico de Rankine.

2.2.2.1 Turbinas a gás

Pelo fato de ter alta confiabilidade e potência as turbinas a gás (TG) são amplamente utilizadas em processos de cogeração. Geralmente TG possuem potências maiores de que 1MW, por possuírem mais eficiência a partir deste valor.

Turbinas a gás operam conforme o ciclo termodinâmico Brayton, onde possui um compressor, câmara de combustão e turbina. Como pode ser visto na figura 2.2 o ar é comprimido pelo compressor e encaminhado para uma câmara de combustão junto com o combustível, após a queima do combustível o gás percorre pela turbina que gera energia para mover um gerador elétrico e assim gerar energia.

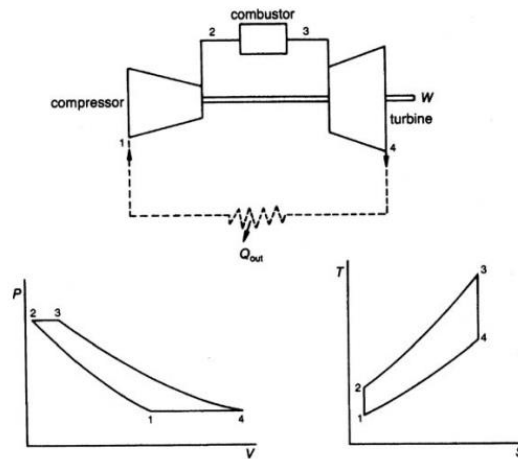


Figura 2.2 Ciclo Brayton, Fonte: Gas turbine engineering

Os gases de exaustão do processo são em torno de 600°C. Com essa alta temperatura e alta vazão é possível recuperar essa energia térmica, utilizando o ciclo Rankine, em uma caldeira de recuperação de calor, por exemplo, gerando vapor para um processo ou para uma turbina a vapor. Este ciclo é denominado ciclo combinado (Brayton+Rankine) e sua eficiência pode chegar a 35 a 55%. A figura 2.3 demonstra os fluxos de massas do ciclo.

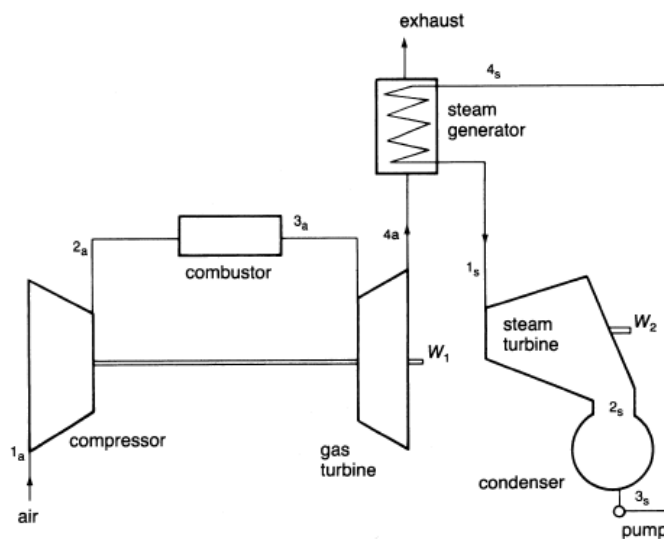


Figura 2.3 Ciclo combinado (Brayton e Rankine), Fonte: Gas turbine engineering

Na tabela abaixo pode-se ver o percentual de energia perdido e produzido comumente visto em plantas de ciclo combinado.

Tabela 2.1 – Perdas de energia em plantas de ciclo combinado. Adaptado de Combined Cycle Gas and Steam Turbine in Power Plants

| Energia | % |
|--|----------|
| Perda no condensador | 38,4% |
| Perda na chaminé | 12,1% |
| Perda devido a radiação pedida na caldeira | 0,2% |
| Perda no fluxo de gás | 0,3% |
| Perda na geração e radiação da TG | 0,6% |
| Perda na geração e radiação da TV | 0,5% |
| Eletricidade gerada na TG | 30,2% |
| Eletricidade gerada na TV | 17,7% |
| Energia total | 100,0% |

Por outro lado, o calor pode ser aproveitado em Chillers por absorção para se obter água fria para resfriamento de um ambiente.

As turbinas a gás podem ser utilizadas com diversos tipos de gases combustíveis, desde que os teores de impurezas como, por exemplo, alcatrão e enxofre atendam as especificações mínimas do equipamento. Abaixo uma tabela com a especificação mínima para utilização de um gás combustível em turbinas a gás.

Tabela 2.2 - Adaptado de Gas Turbine Engineering

| Descrição | Valor |
|--|--------------|
| Contaminação de sólidos | < 30 ppm |
| Limite de inflamabilidade | 2.2:1 |
| Composição de S, Na, K, Li (Enxofre, Sódio, Potássio e Lítio) | < 5 ppm |
| Água | 25% peso |

2.2.2.2 Turbinas a vapor

O ciclo de operação da turbina a vapor é o Rankine, o qual a partir de uma combustão externa de uma caldeira é gerado vapor, este vapor é expandido na turbina e depois encaminhando a um condensador retornando água na alimentação da caldeira. Veja representação do ciclo rankine na figura abaixo.

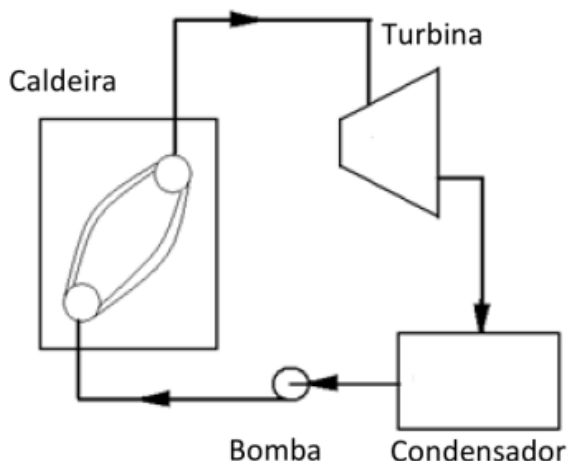


Figura 2.4 - Ciclo Rankine, Fonte: Çengel

Existem turbinas de condensação, onde a pressão de saída do vapor é igual a atmosférica, e as turbinas de contrapressão onde a pressão de saída do vapor é maior ou igual a atmosférica. Essas turbinas são amplamente utilizadas em plantas térmicas e indústrias. O vapor superaquecido é oriundo de uma caldeira que por sua vez utiliza a combustão de um combustível, ou conforme já explanado no item 2.2.2.1, gases de exaustão de altas temperaturas, formando um ciclo combinado. Possuem eficiência térmica de em torno de 85%.

Devido à estrutura de combustão externa em um boiler, este tipo de equipamento é amplamente utilizado com diversos tipos de combustíveis, possibilitando a cogeração a biomassa e outros combustíveis mais limpos.

3. GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA NA INDÚSTRIA

A combustão da biomassa ocorre em diversas etapas as quais dependendo da tecnologia aplicada é possível convertê-la em energia elétrica, ou térmica ou por reações termoquímicas ou bioquímicas ela pode ser transformada em combustível.

A primeira etapa da combustão da biomassa pode-se denominar como secagem, pois ao entrar em uma câmara de combustão a umidade da biomassa começa a evaporar a temperaturas próximas a 100°C. Por tanto nesta etapa libera-se energia térmica em forma de vapor de água oriunda da umidade da biomassa.

Após a secagem da biomassa inicia-se a combustão dos componentes químicos da biomassa, até que todo oxigênio utilizado nesse processo formando hidrocarbonetos alcatrão, CO e CO₂. Esse processo denomina-se pirólise começa a ocorrer quando a temperatura fica em torno de 600 °C.

A pirólise é empregada para se obter o máximo de carvão ou alcatrão, porém se otimizarmos a pirólise aumentando a temperatura de reação para mais de 900°C pode-se obter uma maior quantidade de gás síntese para se utilizar em equipamentos de combustão, por exemplo. Os equipamentos que são projetados para se realizar esse processo são chamados de gaseificadores. Após a gaseificação é possível encontrar teores de CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄.

O processo de combustão da biomassa é iniciado após se realizar a secagem, pirólise e gaseificação da biomassa. Os gases quentes da combustão são direcionados geralmente para as unidades de aquecimento de uma caldeira de biomassa no intuito de se obter vapor superaquecido para processo de uma indústria ou para se utilizar em uma turbina a vapor num ciclo Rankine.

Equipamentos de combustão direta da biomassa é a mais utilizada e possui tecnologias mais avançadas no mundo e equipamentos que fazem pirólise e gaseificação estão se tornando cada vez mais importantes. Abaixo

uma demonstração da gama de opções de tecnologias de conversão termoquímicas aplicadas a biomassa.

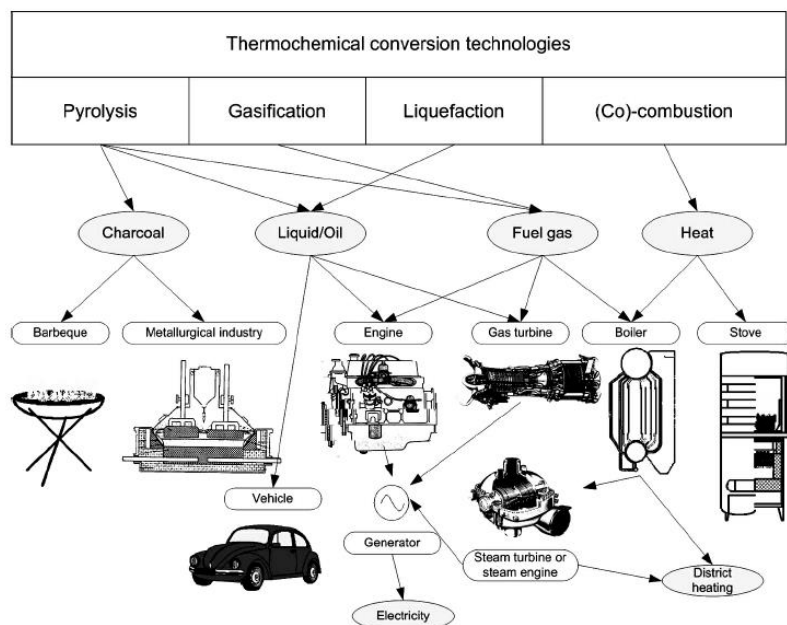


Figura 3.1 Tecnologias de conversão termoquímicas, Fonte: The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing

3.1. Aplicações de gaseificação da biomassa

Fabricantes de equipamentos de combustão com gases combustíveis desenvolveram seu portfolio para utilização de gases de diferentes composições químicas. Assim, existem turbinas, caldeiras e motogeradores que são projetados especificamente para queima com biomassa gaseificada.

3.2. Tipos de Gaseificadores

Existe basicamente dois tipos de gaseificadores: leito fixo e leito fluidizado.

Os de leito fixo são os mais utilizados pelo mundo, por serem de pequeno porte. E dentro desse grupo de gaseificadores existem duas subdivisões: onde a circulação de gases é concorrente e outra onde a circulação é contracorrente.

Gaseificadores de leito fluidizado possui melhores eficiências de conversão da biomassa para gás síntese, porém pelo alto custo e pouco incentivo são pouco utilizados.

3.2.1 Gaseificadores contracorrente

Neste equipamento o fluxo de gás é contrário ao fluxo de alimentação de biomassa. Pelo fato de a alimentação ser pela parte de cima, a biomassa é preaquecida antes de entrar em combustão, aumentando a eficiência térmica. A desvantagem deste tipo de gaseificador é o alto teor de alcatrão na composição química do gás síntese produzido. Assim, é necessário incluir algum equipamento para se reduzir o teor de alcatrão ou utilizar este gás síntese em processos que o alcatrão não influencie em danos no equipamento de combustão.

O gaseificador Lurgi foi amplamente utilizado para transformação de carvão mineral em gás síntese. Neste gaseificador existe um dispositivo para homogeneizar a alimentação do carvão na grelha. Este tipo de gaseificador é pressurizado (2,5 a 3 MPa), por esse motivo possui capacidade 5 vezes a mais que um gaseificador atmosférico.

Gaseificadores contracorrentes são simples de operar, possui facilidade em gaseificar materiais com elevado teor de umidade e materiais inorgânicos, além de operar com temperaturas muito elevadas na grelha, obtendo a capacidade de fundir possíveis metais que entram junto com a biomassa.

A grande desvantagem da utilização deste tipo de equipamento é o alto teor de alcatrão (10 a 20%) gerado na pirolisem restringindo o uso do gás síntese somente para queima direta, não podendo ser queimado em motores de combustão interna ou turbinas.

3.2.2 Gaseificadores concorrentes

Sua forma construtiva é parecida com o gaseificador contracorrente, o que difere é que tanto a biomassa e o ar são alimentados na região superior do gaseificador, onde o gás produzido é levado para parte inferior, onde a temperatura é elevada, possibilitando o craqueamento do alcatrão. Assim, pode-se dizer que esse gaseificador produz um gás combustível mais limpo que o contracorrentes.

A biomassa sofre o processo de secagem ao entrar na câmara do gaseificador pela pirolise que fora realizada pela biomassa que entrou antes dela. Caso a biomassa seja muito úmida, pode ocorrer um retardamento da secagem e da pirolise devido a evaporação da água, neste caso pode ocorrer muita formação de alcatrão. Com o tempo a biomassa vai atingindo temperaturas acima de 200 °C liberando gases voláteis e restando um pouco de carvão vegetal, que por sua vez reage com gases ricos e aquecidos atingindo temperaturas entre 800 a 1200 °C gerando CO e H₂.

A produção de um gás síntese com baixos teores de alcatrão aumentam a quantidade de aplicações em processos de queima como em motores de combustão interna por exemplo. Os materiais inorgânicos ficam na matriz de carvão e cinzas que ficam no fundo do gaseificador, obtendo assim um gás mais limpo que o gaseificador contracorrente.

Esse sistema de gaseificação foi muito utilizado em veículos na Segunda Guerra Mundial, sendo um sistema comprovado tecnicamente. O gás pode ser utilizado em motores de combustão interna a gás sem necessidade de grandes modificações de projeto. Porém a potência pico dos motores ficam reduzidas em 30 a 40%.

Existem limitações quanto a umidade da biomassa a ser colocada no reator que deve ser menor que 20% e sua granulometria uniforme.

3.2.3 Gaseificadores de Leito Fluidizado

Dentro da câmara deste gaseificador existe um material particulado parecida como uma areia formando um leito. Aumentando a vazão e pressão de ar injetado na parte de baixo do leito será atingido a velocidade mínima de fluidização do leito, onde o peso das partículas é igual a força de arraste do ar. Em certos momentos ocorrem um aumento repentino de velocidade surgindo bolhas ou só de ar ou de ar com particulado. Esse fenômeno explica a grande quantidade de particulado sendo arrastado e circulando dentro da câmara. Aumentando mais a vazão e ar, sem elevar a pressão aumenta-se o numero de bolhas, fazendo a velocidade do ar atingir a velocidade terminal ocorrendo arraste do material mais fino.

Caso exista a necessidade de retornar o material fino para o leito, utiliza-se um ciclone. Esse processo se denomina leito circulante. Quando não há retorno, denomina-se leito de arraste.

Gaseificadores de leito fluidizado pode ser tipo borbulhante ou circulante. O borbulhante possui velocidades baixas, em torno de 1 m/s, enquanto o circulante possui velocidades maiores entre 7 a 10 m/s. Em ambos tipos, a biomassa entra em contato com a areia e toda sua área é englobada aumentando a eficiência de gaseificação da biomassa, porém o tipo circulante possui melhor mistura do ar com biomassa por estar com velocidades maiores e maior circulação dentro da câmara.

O controle de temperatura do leito é de extrema importância pois quedas bruscas de temperatura podem causar o empedramento do leito, tendo que esvaziar todo reator e enchê-lo novamente com areia. Este controle depende da vazão de ar injetado no leito e composição química da biomassa.

Existem os gaseificadores borbulhantes onde partículas arrastadas pelo processo não retornam para o leito. A alimentação de biomassa é feita diretamente na zona do leito.

Nos gaseificadores de leito fluidizado circulante as partículas arrastadas pelo processo retornam para o leito. Possui melhor eficiência na conversão de carbono, pelo maior tempo de residência das partículas.

O projeto do gaseificador pode ser elaborado considerando pressões do gás síntese na ordem de 10 a 20 bar, facilitando a utilização deste gás em turbinas a gás, além de aumentar a capacidade do gaseificador.

3.3. Cálculo do Poder Calorífico Superior e Inferior da Biomassa

Segundo o Handbook of Biomass Combustion and Co-firing (HBCC) o poder calorífico superior da biomassa com variação entre 18 a 22 MJ/kg pode ser calculada conforme fórmula abaixo:

Equação 3.1

$$PCS = 0,3491 \cdot X_C + 1,1783 \cdot X_H + 0,1005 \cdot X_S - 0,0151 \cdot X_N - 0,1034 \cdot X_O - 0,0211 \cdot X_{ash} \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

Sendo X_C , X_H , X_S , X_N , X_O e X_{ash} a concentração em peso (base seca) de carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio e cinzas respectivamente da biomassa em análise.

O poder calorífico inferior segundo HBCC é calculada em função do PCS, percentual de umidade w e concentração em peso (base seca) de hidrogênio X_H da composição química da biomassa. Conforme equação abaixo:

Equação 3.2

$$PCI = PCS \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2,444 \cdot \frac{w}{100} - 2,444 \cdot \frac{X_H}{100} \cdot 8,936 \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) [MJ/kg]$$

3.4. Balanço de massa

Abaixo um modelo para cálculo da vazão horária de biomassa que um gaseificador de leito fluidizado pode fornecer.

Pela lei da conservação de massa e considerando o volume de controle da figura 3.3 temos:

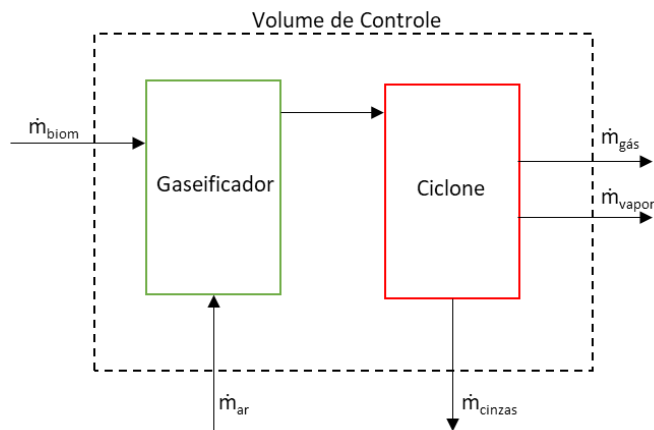


Figura 3.2 - Balanço de massa de um Gaseificador

$$\sum m_e = \sum m_s$$

$$\dot{m}_{biom} + \dot{m}_{ar} = \dot{m}_{cinzas} + \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{vapor}$$

Equação 3.3

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{biom} + \dot{m}_{ar} - \dot{m}_{cinzas} - \dot{m}_{vapor} [kg/h]$$

Sendo:

\dot{m}_{biom} = vazão em massa de biomassa disponível

\dot{m}_{ar} = vazão em massa de ar

\dot{m}_{cinzas} = vazão em massa de cinzas

$\dot{m}_{gás}$ = vazão em massa de gás síntese

\dot{m}_{vapor} = vazão em massa de vapor de água (umidade)

Equação 3.4

$$\dot{m}_{vapor} = \dot{m}_{biom} \cdot \frac{w}{100} [kg/h]$$

Equação 3.5

$$\dot{m}_{cinzas} = \dot{m}_{biom} \cdot \frac{X_{ash}}{100} [kg/h]$$

A gaseificação de biomassa consome apenas cerca de 33% da razão de estequiometria teórica para a queima de madeira (GOSWAMI, 1986).

Sabe-se que a razão de equivalência e excesso de ar é calculada conforme as fórmulas abaixo:

$$\Phi = \frac{(A/C)_{stq}}{(A/C)_{real}} = 0,33$$

$$\% \text{ excesso de ar} = \frac{(1 - \Phi)}{\Phi} = \frac{(1 - 0,33)}{0,33} = 2,03 \left(\frac{kg_{ar}}{kg_{biom}} \right)$$

Equação 3.6

$$\dot{m}_{ar} = \dot{m}_{biom} \cdot 2,03 [kg/h]$$

Assim, basta saber a vazão de biomassa disponível em uma planta de papel celulose e a composição química da biomassa, é possível determinar a vazão de gás síntese produzido pelo gaseificador.

3.5. Vantagens e barreiras

O produto final dos gaseificadores, além do gás síntese, possui o alcatrão, partículas solidas, metais, sulfetos e amônia que precisam de um sistema de limpeza para serem removidos quando o gás for utilizado em equipamentos que exigem um gás sem essas impurezas para seu funcionamento. Esse sistema pode encarecer ainda mais o investimento.

A operação de um gaseificador exige uma mão de obra qualificada e experiente, e a pouca utilização deste sistema no mercado brasileiro diminui muito a quantidade de profissionais disponíveis para operação deste sistema.

Essa baixa qualidade operacional acaba afetando a eficiência do equipamento, diminuindo sua confiabilidade.

Pelo fato de baixo incentivo nesse tipo de equipamento o custo dos equipamentos acaba sendo oneroso e a princípio diminui a atratividade de um investidor para compra deste equipamento.

Normalmente, obtém-se energia a partir da biomassa utilizando uma caldeira de força que com a combustão da biomassa gera-se vapor superaquecido para uma turbina a vapor, conforme o ciclo Rankine. A possibilidade de se gerar energia queimando o gás síntese de biomassa diretamente em uma turbina ou motor a gás sem a necessidade de um ciclo a vapor é uma grande vantagem pois é possível obter uma eficiência maior de geração de energia elétrica.

4. COGERAÇÃO EM INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

O setor de papel e celulose brasileiro possui grandes consumo vapor e eletricidade, por tanto a cogeração se torna um processo de extrema importância para eficiência energética deste setor. Uma fábrica de celulose consome entre 5 a 6 toneladas de vapor por tonelada de celulose produzida e entre 0,5 a 0,6 MWh por tonelada de celulose (Foelkel, 2016). Os processos que mais oneram vapor são os aquecimentos, evaporações e secagens.

Na maioria das usinas de plantas de papel e celulose que produzem o licor preto krat a cogeração é muito utilizada pois são plantas extremamente grandes que consome muita eletricidade e produção de muita energia térmica proeminente dos vapores gerados no processo de produção. Por possui altas demandas elétricas e térmicas, as fabricas possuem a preocupação com o equilíbrio nos seus arranjos produtivos. O equilíbrio seria com relação ao balanço de produção de consumo de vapor superaquecido, vapor de média e baixa pressão, eletricidade para geração distribuída e condensados do processo.

4.1. Tipos de Cogeração

O fato de explorar o licor preto o máximo que pode, as plantas de papel celulose pode requerer caldeiras de queima de biomassa residual do seu processo industrial. De forma comum, as empresas de papel celulose vendem energia ao sistema elétrico nacional para adquirir compensação em suas contas de energia.

Abaixo alguns cenários de cogeração comuns encontrados em indústrias de papel e celulose:

- a) O licor preto não supre a demanda de eletricidade e vapor da planta, tendo que ser instalada uma caldeira de biomassa, que será projetada para produzir todo vapor para fábrica e quantidade de energia acima do necessário para venda.
- b) As demandas de vapor são atendidas em sua totalidade pelo licor preto, porém não atende a demanda elétrica. A planta pode optar em comprar energia por uma concessionaria local, ou instalar uma

caldeira auxiliar para produção de vapor e utilizá-lo em uma turbina a vapor, ou então instalar uma turbina a gás.

- c) Vapor e eletricidade são produzidos em totalidade a partir do licor preto. Neste caso, não há necessidade de uma caldeira auxiliar e todo insumo de biomassa pode ser vendido.
- d) Caso o licor preto só atenda às necessidades elétricas da planta é possível instalar uma caldeira auxiliar de biomassa para produção de vapor faltante e qualquer excesso de eletricidade pode ser vendido por geração distribuída.
- e) Vapor e eletricidade são produzidos em totalidade a partir do licor preto e ao invés de vender a biomassa, é possível construir uma caldeira auxiliar para geração de eletricidade como um produto adicional da fábrica.

4.2. Vantagens e barreiras

A cogeração em indústrias de papel e celulose demonstra muitas vantagens, pode-se citar o melhoria da eficiência energética da planta que pode chegar a 80%; aproveitamento melhor do vapor produzido diminuindo a taxa de condensado formado; utilização dos insumos de biomassa (combustíveis renováveis) produzidas na planta em sua totalidade, diminuindo assim a quantidade de descarte de resíduos sólidos; redução de custo de produção, diminuindo o preço final do produto da planta; geração de vapor e eletricidade de forma contínua sem depender de outro fornecedor; possibilidade de obter certificados de carbono para o mercado de carbono.

5. ESTUDO DE CASO COGERAÇÃO

Neste capítulo será realizado um estudo de caso sobre a cogeração de biomassa de casca de eucalipto gaseificada numa usina de papel e celulose, levando-se em consideração análises técnicas e econômicas em um caso comum de cogeração a partir da utilização gás natural.

5.1. Análise técnica

Serão adotados os parâmetros abaixo para o estudo de caso. Todos parâmetros são valores conforme visto comumente em indústrias de papel e celulose.

5.1.1 Fluxograma da Planta de Cogeração

A figura 5.1 representa um fluxograma da planta de cogeração proposta nessa monografia. Para geração de eletricidade a planta terá duas turbinas a gás, sendo uma operada com gás síntese produzido por um gaseificador de leito fluidizado e outra turbina a gás natural. Os gases de exaustão de ambas TG irão para uma caldeira de recuperação de calor que fornecerá vapor para um processo da fábrica e para uma turbina a vapor.

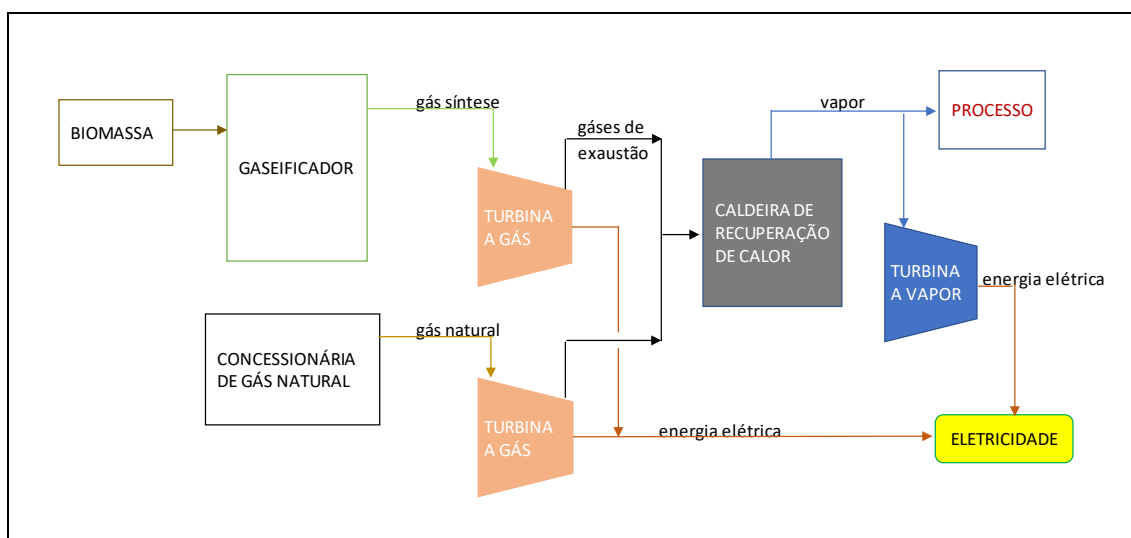


Figura 5.1 – Fluxograma da Planta de Cogeração do estudo

5.1.2 Biomassa

- Incremento Médio Anual (IMA) de uma plantação de eucalipto = 40 m³/ha.ano
- Idade de colheita = 7 anos
- Teor volumétrico da casca de eucalipto = 10%

- Densidade da casca no tronco = 0,3 ton secas/m³ verde
- Área plantada de eucalipto = 2400 ha
- Eficiência do descascador de biomassa = 70%
- Composição química da casca de eucalipto segundo Foelkel, 2016:

Tabela 5.1 Composição química da casca de Eucalipto, Fonte: Foelkel, 2016

| Constituinte | Casca (%) | considerado (%) |
|--------------|-------------|-----------------|
| Carbono | 41 a 47 | 47,00% |
| Oxigenio | 31 a 35 | 35,00% |
| Hidrogenio | 4,7 a 5,5 | 5,50% |
| Nitrogenio | 0,3 a 0,5 | 0,50% |
| Enxofre | 0,03 a 0,06 | 0,06% |
| Cinzas | 2 a 8 | 8,00% |

Considerada umidade de 11%.

- Composição química dos gás combustível formado no gaseificador

Tabela 5.2 - Composição química dos gás combustível formado no gaseificador

| Análise química dos gases combustível | Teor |
|---------------------------------------|---------|
| CH ₄ | 5,00% |
| CO | 14,00% |
| H ₂ | 2,28% |
| CO ₂ | 22,00% |
| N ₂ | 56,72% |
| Mistura | 100,00% |

5.1.3 Demandas elétricas e térmicas

Será considerado o modelo b do item 4.1 para projeto da usina de geração de energia. Segue abaixo os dados:

- Turbina a gás da Kawasaki, modelo GPB15D.
Geração elétrica = 1,45 MWe; eficiência elétrica em base PCI = 23,6%; energia não aproveitada = 10% da energia do combustível utilizado.
Serão utilizadas duas turbinas: uma utilizando como combustível 100% de gás síntese oriundo de um gaseificador e outra 100% de gás natural.
- Poder calorífico inferior (PCI) do Gás natural = 8600 kcal/m³

- Caldeira de recuperação de calor com pressão de saída do vapor superaquecido de 45 bar a uma temperatura de 450 °C, eficiência em base PCI de 85%. A temperatura da água de alimentação de 80 °C. Será considerado caso 1 = 60% da vazão irá para turbina a vapor e caso 2 = 100% da vazão irá para turbina a vapor.
- A turbina a vapor será modelo MCT da TGM. Será adotado uma eficiência de geração de energia em 85%. Segundo consta no catálogo desta turbina, sua potência nominal de saída é de 3 MW, pressão de admissão é 45 bar (a) e Temperatura de admissão é de 450°C,

5.1.4 Cálculo da produção de biomassa

No intuito de se calcular a vazão de gás síntese, é necessário calcular a quantidade de produção de casca por dia por um descascador de eucalipto conforme dados iniciais que constam no item 5.1.1.

Considerando que o descascador trabalhe por 24 horas no dia, a vazão de casca de eucalipto a ser alimentada no gaseificador será de 2785 kg/h.

Tabela 5.3 - Cálculo da Produção de casca de eucalipto

| Dado | Fórmula | Valor | Unidade |
|--|----------------|----------|------------------|
| IMA Volumetrico | IMAv | 40 | m³/ha.ano |
| Idade da colheita | IC | 7 | anos |
| Produção de madeira+casca na colheita | $Pmc=IMAv*IC$ | 280 | m³/ha |
| Média do Teor volumetrico de casca no tronco | mtvc | 10% | - |
| Média do Teor volumetrico de madeira no tronco | $100-mtvc$ | 90% | - |
| Produção estimada de casca | $Pec=Pmc*mtvc$ | 28 | m³/ha |
| Densidade basica da casca | Dbc | 0,3 | t secas/m³ verde |
| Peso seco de casca na colheita | $Psc=Pec*Dbc$ | 8,4 | ton/ha |
| Hectares | Ha | 4150 | ha |
| Produção de casca | $Pct=Psc*Ha$ | 34860 | ton |
| | Pcd | 95506,85 | kg/dia |
| Eficiencia do descascador | Efd | 70% | - |
| Produção efetiva de casca por dia | $Pefc=Pcd*Efd$ | 66854,79 | kg/dia |
| Produção de casca por hora | Pefch | 2785,62 | kg/h |

5.1.5 Cálculo do Poder calorífico da Biomassa

Considerando a composição química da casca de eucalipto conforme consta nos dados do item 5.1.1, pode-se calcular o PCS e PCI conforme equações 3.1 e 3.2.

Tabela 5.4 - Cálculo do PCI da casca de eucalipto

| Constituinte | Base seca |
|---------------|-----------|
| C | 47,00% |
| H | 5,50% |
| O | 35,00% |
| N | 0,50% |
| S | 0,06% |
| Cinzas | 8,00% |
| Umidade | 11,00% |
| PSC (MJ/kg) | 19,10 |
| PCI (MJ/kg) | 15,66 |
| PCI (kcal/kg) | 3742,89 |

5.1.6 Cálculo da vazão de combustível produzido pelo gaseificador

Utilizando o balanço de massa e equações que constam no item 3.4 é possível se determinar a vazão mássica de combustível que sai do gaseificador.

Tabela 5.5 - Cálculo da vazão de combustível produzido pelo gaseificador

| Descrição | Fórmula | Valor | Unidade |
|---------------------------|--|-----------|---------|
| Vazão mássica de biomassa | P_{efch} | 2.785,62 | kg/h |
| PCI da biomassa | PCI bio | 15,66 | MJ/kg |
| Energia disponível | $E_d = P_{efch} * PCI \text{ bio}$ | 43.623,45 | MJ/h |
| Excesso de ar | Ex ar | 2,03 | - |
| Vazão mássica de ar | $V_{ma} = P_{efch} * Ex \text{ ar}$ | 5.655,65 | kg/h |
| Umidade da biomassa | Um bio | 11,00% | - |
| Cinzas | Ash | 7,12% | - |
| Vazão mássica de água | $V_{mag} = P_{efch} * Um \text{ bio}$ | 306,42 | kg/h |
| Vazão mássica de cinzas | $V_{mc} = P_{efch} * ash$ | 198,34 | kg/h |
| Vazão de combustível | $V_c = P_{efch} + V_{ma} - V_{mag} - V_{mc}$ | 7.936,51 | kg/h |

Considerando que a composição química do gás síntese seja igual ao informado no item 5.1.1, é possível calcular o seu poder calorífico inferior.

Tabela 5.6 - Composição química do gás síntese

| Análise química dos gases combustíveis | Teor | densidade | Poder calorífico | | PCIv |
|--|---------|-----------|------------------|----------------|--------|
| | | kg/Nm³ | kcal/kg | Kcal/Nm³ | MJ/Nm³ |
| | | dens | PCIp | PCIv=PCIp*dens | |
| CH ₄ | 5,00% | 0,717 | 11,954 | 8,571 | 35,861 |
| CO | 14,00% | 1,260 | 2,415 | 3,043 | 12,731 |
| H ₂ | 2,28% | 0,091 | 28,669 | 2,602 | 10,888 |
| CO ₂ | 22,00% | 1,980 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| N ₂ | 56,72% | 1,266 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mistura | 100,00% | 1,368 | 1,589 | 0,914 | 3,824 |

A vazão volumétrica de gás síntese calculada na tabela abaixo será importante para os cálculos de dimensionamento da Cogeração.

Tabela 5.7 - Cálculo da eficiência a frio do gaseificador

| Descrição | Formula | Valor | Unidade |
|-----------------------------------|--|-----------|--------------------|
| Vazão volumetrica de comb | $V_{vc}=V_c \cdot \text{dens}$ | 5.801,22 | Nm ³ /h |
| PCI do combustível | PCI _v | 3,82 | MJ/Nm ³ |
| Energia do combustível | $E_c=V_{vc} \cdot \text{PCI}_v$ | 22.182,15 | MJ/h |
| Eficiencia a frio do gaseificador | $\text{Eff}_{\text{gas}}=(\text{Pefch} \cdot \text{PCI}_{\text{bio}})/(V_{vc} \cdot \text{PCI}_v)$ | 51% | - |

Na tabela 5.7, pode-se ver que a eficiência a frio do gaseificador é de 51%, o que significa que o gaseificador tem a capacidade de manter 51% do poder calorífico inferior da biomassa que entrou no reator.

5.1.7 Cálculo da turbina a gás

Para decisão de escolha da potência da turbina foi levado em consideração a vazão máxima que o gaseificador pode oferecer, com o poder calorífico inferior do gás síntese é possível encontrar a energia total fornecida pelo combustível, assim considerando uma perda de 10% de energia por convecção e a eficiência elétrica da turbina encontramos a potência. Ao procurar no mercado encontrou-se a turbina a gás da Kawasaki, modelo GPB15D descrita no item 5.1.1 cuja potência elétrica é de 1,45 MWe.

Por questões operacionais e para aumentar a confiabilidade de obtenção de energia foi inclusa uma turbina a gás natural, para ser utilizada quando houver algum problema de abastecimento de gás síntese.

Tabela 5.8 - Turbinas a gás síntese e a gás natural

| Descrição | Formula | TG gas sintese | TG gas natural | Unidade |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|---------|
| Potência eletrica | Pe | 1,45 | 1,45 | MWe |
| Eficiencia da turbina | Eft | 23,6% | 23,6% | |
| Energia termica produzida | Etp=Et-Pe | 4,69 | 4,69 | MWt |
| Energia térmica não aproveitada | Etna=Et*0,1 | 0,61 | 0,61 | MWt |
| Energia total | Et=Pe/Et | 6,14 | 6,14 | MW |
| | | 5.282.947,72 | 5.282.947,72 | kcal/h |
| Biomassa Gaseificada | | | | |
| Vazão | Vvc'=Epb/PCl b | 5.780,73 | 0,00 | Nm³/h |
| PCI | PCl v | 913,89 | 0,00 | kcal/m³ |
| Energia produzida pela Biomassa | Epb = Et*%u | 5.282.947,72 | 0,00 | kcal/h |
| Percentual de utilização | %u | 100% | 0% | - |
| Gas Natural | | | | |
| Vazão | Vvc'=Epb/PCl b | 0,00 | 614,30 | Nm³/h |
| PCI | PCl gn | 8.600,00 | 8.600,00 | kcal/m³ |
| Energia produzida pelo GN | Ep gn = Et-Epb | 0,00 | 5.282.947,72 | kcal/h |
| Percentual de utilização | %u gn =Ep gn /Et | 0% | 100% | - |

O percentual de utilização descrito na tabela 5.8 é referente a máxima vazão volumétrica possível do gás combustível atendendo a 100% da capacidade da turbina.

5.1.8 Cálculos para caldeira de recuperação de calor

Obtendo a soma da energia térmica produzida pela turbina de gás síntese e pela turbina de gás natural trabalhando simultaneamente e considerando que o vapor superaquecido gerado pela caldeira de recuperação de calor seja encaminhado para uma turbina a vapor foram realizados os cálculos na tabela 5.8 para se encontrar a vazão de vapor disponível para TV.

O caso 1 é o cálculo da vazão de vapor no caso da planta de papel celulose decidir utilizar 40% do vapor produzido pela a caldeira em algum processo interno. Já o caso 2 foi considerado que 100% do vapor seja utilizado na turbina a vapor.

Os dados de pressão e temperatura de vapor superaquecido foram considerados conforme os dados operacionais requeridos pela turbina a vapor selecionada no item 5.1.1.

Tabela 5.9 - Cálculo do vapor produzido pela caldeira de recuperação de calor

| Descrição | Fórmulas | Caso 1 | Caso 2 | Unidade |
|--|---|-----------|-----------|---------|
| Energia termica produzida pela turbina gás síntese + turbina a gas natural | $E_{tt}=E_{tp}*2$ | 8,16 | 8,16 | MWt |
| Pressão do vapor para turbina a vapor | Pv | 45,00 | 45,00 | bar |
| Tempertatura do vapor para turbina a vapor | Tv | 450,00 | 450,00 | °C |
| Entalpia do vapor superaquecido | Hv | 793,98 | 793,98 | kcal/kg |
| Temperatura da agua de alimentação da caldeira | Ta | 80,00 | 80,00 | °C |
| Entalpia da agua de alimentação | Ha | 80,00 | 80,00 | kcal/kg |
| Eficiencia de uma caldeira de recuperação de calor (PCI) | Effcr | 85% | 85% | - |
| Vazão de vapor necessaria | $V_{vn}=E_{tt}*859845,24/(Effcr*(Hv-Ha))$ | 11.560,31 | 11.560,31 | kg/h |
| % Vapor para processo | %vp | 40% | 0% | - |
| Vazão de vapor para processo | $V_{vp}=V_{vn}* \%vp$ | 4.624,12 | 0,00 | kg/h |
| Vazão de vapor para turbina a vapor | $V_{vtv}=V_{vn}-V_{vp}$ | 6.936,18 | 11.560,31 | kg/h |

5.1.9 Cálculos para turbina a vapor

Mantendo os casos descritos no item 5.1.7 foi calculada a energia elétrica produzida pela turbina a vapor considerando uma eficiência de geração de eletricidade da turbina igual a 85%.

Tabela 5.10 - Potência elétrica gerada pela Turbina a Vapor

| Descrição | Fórmulas | Caso 1 | Caso 2 | Unidades |
|---|----------------------------|------------|--------------|----------|
| % Vapor produzido para turbina | $\%vptv=1-\%vp$ | 60% | 100% | - |
| Vazão de vapor para turbina a vapor | Vv tv | 6.936,18 | 11.560,31 | kg/h |
| Pressão do vapor para turbina a vapor | Pv | 45,00 | 45,00 | bar |
| Temperatura do vapor para turbina a vapor | Tv | 450,00 | 450,00 | °C |
| Entalpia do vapor superaquecido | Hv | 793,98 | 793,98 | kcal/kg |
| Pressão de vapor na saída da turbina | Pstv | 10 | 10 | bar |
| Entalpia do vapor saturado | Hvs | 663,74 | 663,74 | kcal/kg |
| Energia produzida pela turbina | $E_{ptt}=Vv_{tv}*(Hv-Hvs)$ | 903.404,19 | 1.505.673,66 | kcal/h |
| | | 1,05 | 1,75 | MW |
| Eficiência da geração de energia | Effge | 85% | 85% | - |
| Energia elétrica produzida | $E_{eptv}=E_{ptt}*Effge$ | 0,89 | 1,49 | MWe |

5.2. Análise econômica (Payback, TIR, VPL)

5.2.1 Estimativa da quantidade e custo de energia produzida em um ano

Para estimar a energia total produzida pelas turbinas a gás e a vapor, foram considerados fatores de uso e de carga. O critério utilizado foi considerando que a biomassa possui custo zero para a planta de papel e celulose por ser insumo, então o seu fator de utilização é maior que o da turbina a gás natural. Porém, não foi considerado um fator de utilização baixo da turbina a gás natural pelo fato de haver algum problema de abastecimento de cavacos de biomassa no biodigestor e faltar gás síntese para geração de energia.

O fator de carga utilizado é considerado usual em plantas de cogeração.

Tabela 5.11 - Energia Produzida em um ano pelas TG

| Descrição | Fórmula | TG biomassa | TG gas natural | Unidade |
|---------------------------------|------------------------------|---------------|----------------|---------|
| Potência da TG | Pe | 1,45 | 1,45 | MW |
| Fator de uso | Fu | 95% | 70% | - |
| Fator de carga | Fc | 85% | 85% | - |
| Energia produzida pela TG anual | $E_{pa}=Pe*Fu*Fc*360*24$ | 10116,36 | 7454,16 | MWh |
| | $E_{pat}=E_{pabio}+E_{pagn}$ | 17.570,52 | | MWh |
| | | 17.570.520,00 | | kWh |
| Potência da TV | E_{eptv} | 1,49 | | MW |
| Fator de uso | Fu | 95% | | - |
| Fator de carga | Fc | 85% | | - |
| Energia produzida pela TV anual | $E_{ptva}=E_{eptv}*Fu*Fc$ | 10.384,50 | | MWh |
| | | 10.384.503,50 | | kWh |
| Energia total produzida | $E_{tp}=E_{pat}+E_{ptva}$ | 27.955.023,50 | | kWh |

Para o cálculo do custo de energia elétrica foi considerado a concessionária Enel subgrupo A4, tarifa verde.

Esse custo é o valor que a planta de papel e celulose estaria deixando de gastar por estar produzindo a mesma.

Tabela 5.12 - Custo da energia elétrica

| <i>Cálculo custo de Energia Elétrica - CONVENCIONAL</i> | | | | | Verde R\$ 0,000 / kWh |
|---|-------------------|-------------------|--------------|---------------|-----------------------|
| enel - A4 AZUL | Custo s/ Impostos | Custo c/ Impostos | Demanda (kW) | Consumo (kWh) | Custo (R\$) |
| Demanda Ponta | R\$ 17,36 /kW | R\$ 23,86254 /kW | 4.390 | - | 1.257.079 |
| Demanda Fora Ponta | R\$ 11,17 /kW | R\$ 15,35395 /kW | 4.390 | - | 808.846 |
| Consumo Anual na Ponta | R\$ 0,46882 /kWh | R\$ 0,64443 /kWh | - | 4.589.631 | 2.957.678 |
| Consumo Anual Fora de Ponta | R\$ 0,31536 /kWh | R\$ 0,43348 /kWh | - | 23.365.393 | 10.128.536 |
| Total Anual | | | | 27.955.024 | 15.152.139 |
| Custo Específico EE (R\$/MWh) | | | | | 542,02 |
| Impostos inclusos: | | | | PIS/PASEP | 1,65% |
| | | | | COFINS | 7,60% |
| | | | | ICMS | 18,0% |

5.2.2 Estimativa do consumo e custo anual de gás anual

Utilizando a vazão de gás calculada no item 5.1.6 e considerando os fatores de uso e de carga aplicados no item 5.2.1 pode-se estimar o consumo de gás anual.

Tabela 5.13 Consumo anual de gás natural

| Descrição | Formula | TG biomassa | TG gas natural | Unidade |
|-------------------------|-----------------------------|-------------|----------------|---------|
| Potencia da TG | Pe | 1,45 | 1,45 | MW |
| Fator de uso | Fu | 95% | 70% | - |
| Fator de carga | Fc | 85% | 85% | - |
| Energia produzida anual | $E_{pa}=Pe*Fu*Fc*360*24$ | 10116,36 | 7454,16 | MWh |
| Consumo de gás natural | Vvc' | - | 614,30 | Nm³/h |
| Consumo de gás anual | $V_{gna}=Vvc'*Fu*Fc*360*24$ | - | 3.157.974,14 | m³/ano |
| Consumo de gás mensal | $V_{gna}=Vvc'*Fu*Fc*30*24$ | - | 263.164,51 | m³/mês |

Tabela 5.14 - Fatura mensal de gás natural

Volume mensal: 263.165 m³

| | | |
|------------------|-----------------------------|------------------------|
| COGERAÇÃO | Valor fatura s/ ICMS | R\$ 443.883,65 |
| | Valor fatura c/ ICMS | R\$ 522.216,06 |
| | Tarifa média s/ ICMS | 1,686715 R\$/m³ |
| | Tarifa média c/ ICMS | 1,984371 R\$/m³ |

Tomando como base o preço do metro cúbico de gás natural fornecido pela Comgás, o valor total das somas das faturas mensais no ano será 12 meses vezes o valor da fatura mensal calculada na tabela 5.14, ficando com R\$ 6.266.592,67 reais anuais (com ICMS).

Para se utilizar essa tarifa é necessário que a cogeração seja qualificada, a qual será tratada no capítulo 6 deste estudo.

5.2.3 Estimativa do investimento no sistema de gaseificação com ciclos combinados

A potência instalada da usina é a soma das potências das turbinas instaladas, com o custo unitário por kW é possível estimar o custo total de

todos equipamentos, obra civil e engenharia inclusos no investimento total do sistema.

Tabela 5.15 - Estimativa do investimento no sistema de gaseificação com ciclos combinados

| Potencia instalada - 1450+1450+3000 (kW) | | | 5900 | | |
|--|---------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Item | Percentual do custo | Custo FOB (U\$) | Custo FOB (R\$) | Custo CIF (U\$) | Custo CIF (R\$) |
| Obra civil | 16,29% | 1.310.604,55 | 5.504.539,09 | 1.729.998,00 | 7.265.991,60 |
| Equipamentos | | | | | |
| Caldeira e auxiliares | 11,11% | 893.850,00 | 3.754.170,00 | 1.179.882,00 | 4.955.504,40 |
| Turbina a vapor e condensador | 6,89% | 554.331,82 | 2.328.193,64 | 731.718,00 | 3.073.215,60 |
| Ciclo termico | 3,56% | 286.418,18 | 1.202.956,36 | 378.072,00 | 1.587.902,40 |
| Turbina a gás | 24,44% | 1.966.309,09 | 8.258.498,18 | 2.595.528,00 | 10.901.217,60 |
| Geração e distribuição | 4,44% | 357.218,18 | 1.500.316,36 | 471.528,00 | 1.980.417,60 |
| Instrumentação e controle | 5,56% | 447.327,27 | 1.878.774,55 | 590.472,00 | 2.479.982,40 |
| Sist. de água | 3,56% | 286.418,18 | 1.202.956,36 | 378.072,00 | 1.587.902,40 |
| Torre de resfriamento | 2,00% | 160.909,09 | 675.818,18 | 212.400,00 | 892.080,00 |
| Gaseificador de leito fluidizado | - | 150.000,00 | 630.000,00 | 198.000,00 | 831.600,00 |
| Montagem | | | | | |
| - Caldeira e auxiliares | 6,19% | 498.013,64 | 2.091.657,27 | 657.378,00 | 2.760.987,60 |
| - Turbina , condensador | 2,38% | 191.481,82 | 804.223,64 | 252.756,00 | 1.061.575,20 |
| - Ciclo termico | 2,48% | 199.527,27 | 838.014,55 | 263.376,00 | 1.106.179,20 |
| - Geração e distribuição | 0,73% | 58.731,82 | 246.673,64 | 77.526,00 | 325.609,20 |
| - Instrumentação e controle | 0,39% | 31.377,27 | 131.784,55 | 41.418,00 | 173.955,60 |
| - Sist. de água | 0,71% | 57.122,73 | 239.915,45 | 75.402,00 | 316.688,40 |
| - Sist. Auxiliar | 0,41% | 32.986,36 | 138.542,73 | 43.542,00 | 182.876,40 |
| Engenharia | 4,00% | 321.818,18 | 1.351.636,36 | 424.800,00 | 1.784.160,00 |
| Administração | 4,86% | 391.009,09 | 1.642.238,18 | 516.132,00 | 2.167.754,40 |
| Total | 100,00% | 8.195.454,55 | 34.420.909,09 | 10.818.000,00 | 45.435.600,00 |
| C.U U\$/kW FOB | 1.363,64 | Construção = 36 meses vida útil = 25 anos | | | |
| C.U U\$/kW CIF | 1.800,00 | | | | |
| Cambio dolar-real | 4,20 | | | | |

A única alteração realizada na tabela acima de Santos, Nelson foi o custo unitário por kW conforme (Torquato 2005) está entre 1500 a 1800 U\$/kW.

5.2.4 Fluxo de caixa

Para o fluxo de caixa, foi considerado que o total de energia produzida pelo sistema é o que a planta de papel e celulose irá obter lucro em cima do que gastaria se pagasse o valor consumido para ENEL.

A fatura de gás natural anual calculada no item 5.2.2 deverá ser subtraída do lucro citado acima.

Manutenções anuais no sistema proposto neste estudo foi estimada em R\$ 1.000.000,00.

Tabela 5.16 - Fluxo de Caixa

| Descrição | Valor |
|--|-------------------------|
| Consumo de gn em um ano [m³/ano] | 3.157.974,14 |
| Produção de Energia eletrica pela TG em um ano [kWh] | 27.955.024 |
| | |
| Custo da energia eletrica produzida em um ano | R\$ 15.152.139,30 |
| Fatura de GN em um ano | R\$ 6.266.592,67 |
| Manutenções por ano | R\$ 1.000.000,00 |
| Economia de energia em um ano | R\$ 7.885.546,64 |

5.2.5 Payback

Para o cálculo do pay back foram considerados três cenários com as taxas de desconto de 6%, 12% e 16%, fluxo de caixa conforme item 5.2.4 e investimento de acordo com o item 5.2.3. Obtendo os pay backs relacionados na tabela 5.12.

Equação 5.1

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+r)^t} - Inv$$

Sendo:

VPL = Valor presente Líquido; r = taxa de desconto; FC = Fluxo de caixa para t de 1 a n; Inv = Investimento Inicial em t=0.

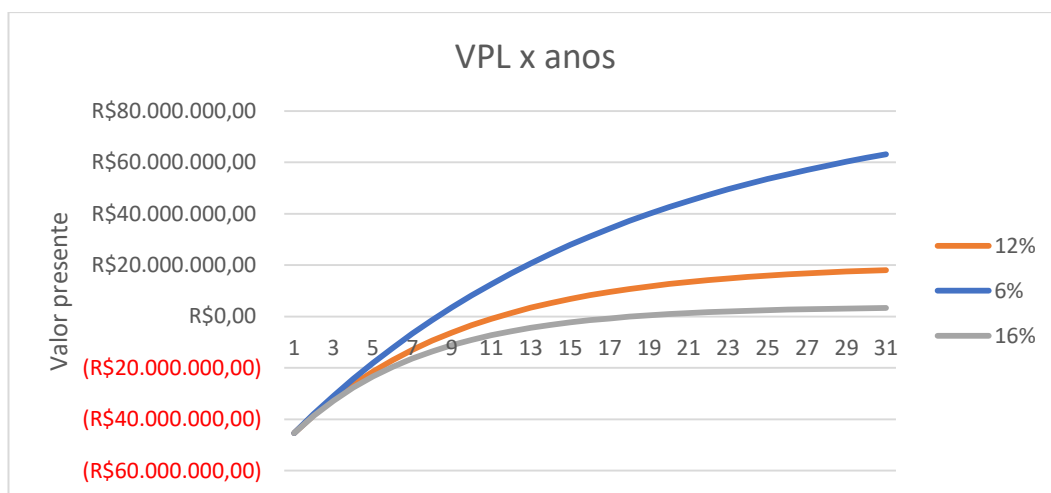


Figura 5.2 - Gráfico do Valor Presente x anos

Tabela 5.17 - Resultados da TIR e Payback

| Taxa | 6% | 12% | 16% |
|----------------|-----|-----|-----|
| Payback (anos) | 8 | 11 | 18 |
| TIR | 11% | 5% | 1% |

6. Certificação Qualificada

Conforme estabelecido na resolução normativa N°235, para obter-se a certificação na Cogeração deve-se atender aos requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento dos requisitos abaixo respectivamente:

Equação 6.1 - Requisitos mínimos de racionalidade energética

$$\text{a) } \frac{E_t}{E_f} \geq 15\% \qquad \text{b) } \left(\frac{E_t}{E_f} \right) \div X + \frac{E_e}{E_f} \geq F_c\%$$

Tabela 6.1 - Certificação na Cogeração

| Descrição | valor | unidade |
|------------------|----------|---------|
| Energia da fonte | 12,28814 | MWh/h |
| Energia termica | 7,90 | MWh/h |
| Energia eletrica | 4,39 | MWh/h |
| requisito a | 64% | cumpre |
| X | 2,5 | - |
| Fc | 32 | - |
| requisito b | 61% | cumpre |

7. CONCLUSÕES

Atualmente, a indústria de papel e celulose utiliza a cogeração como um meio de se obter eficiência energética em seus processos. É muito comum utilizar um ciclo Rankine queimando de biomassa residual em caldeiras de biomassa para obter vapor superaquecido e alimentar uma turbina a vapor para obtenção de energia elétrica. A queima direta de um gás síntese de biomassa produzida por um gaseificador, pode ser uma boa alternativa de cogeração, porém sua nacionalização e melhorias em sua tecnologia devem ser avaliados para melhorar o período de retorno financeiro.

No intuito de se obter a melhor viabilidade possível é necessário que projetos para utilizar gás síntese produzido por gaseificadores em sistema de cogeração com ciclo combinado (Brayton e Rankine) tenham uma produção confiável de biomassa a ser alimentada no gaseificador. A confiabilidade de disponibilização de biomassa, são é somente fisicamente e sim em termos de qualidade da biomassa também.

A influência de um bom valor de Poder Calorífico da Biomassa a ser alimentada no gaseificador é algo que deve ser constantemente observado pela planta de papel e celulose pois aumentando o PCI da biomassa, o PCI do gás síntese aumenta também, diminuindo a necessidade de se utilizar a turbina a gás natural, ou seja será necessário comprar energia da concessionária de gás natural para completar a energia necessária para a planta. A correta operação do gaseificador também pode influenciar no fluxo de caixa, pois a relação ar combustível no reator também influencia no PCI, neste caso uma equipe experiente e bem treinada e familiarizada com a operação do gaseificador é preponderante para o sucesso na sua operação.

A cogeração utilizando gaseificadores pode-se tornar muito vantajosa se a tecnologia de conversão da biomassa para gás for eficiente, nota-se que para uma vazão de gás síntese de 5801 Nm³/h é necessária uma vazão de alimentação de biomassa no gaseificador de 2786 kg/h e para se obter essa quantidade horaria de biomassa é necessária uma colheita em uma área de 4150 hectares. Caso ocorra algum problema na colheita, existirá uma perda significativa de gás síntese na saída do gaseificador, mudando o cenário no payback deste estudo.

Para uma otimização do payback entende-se necessário fazer uma boa administração do fator de uso das turbinas a gás e de biomassa, pois quanto mais utilizar a turbina de biomassa maior será o fluxo de caixa calculado no item 5.2.4 deste estudo.

Os valores de TIR (Taxa interna de retorno) encontradas na tabela 5.12 mostram que o projeto é realmente viável em apenas quando a taxa de desconto é de 6%. Nota-se que em taxas maiores que 16% nunca será possível obter algum lucro futuro. Mesmo assim, os valores de payback encontrados na tabela são satisfatórios a longo prazo, no entanto qualquer oscilação na safra de eucalipto pode influenciar no retorno financeiro do investidor. Assim, faz-se necessário investimentos em melhoria na eficiência de gaseificadores, melhorar a assertividade de disponibilidade de biomassa e mais incentivos para utilização deste equipamento para se obter paybacks mais atrativos para essa forma de cogeração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução nº 235 de 14/11/06*. Brasília: ANEEL, 2006. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 08 jul. 2014.

ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA. *Mercado potencial de cogeração*. São Paulo: COGEN, 2014. Disponível em <<http://cogensp.com.br>>. Acesso em: 08 jul. 2014.

ANDREOS, Ronaldo. *Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

THE EUROPEAN ASSOCIATION FOR THE PROMOTION OF COGENERATION. *What is Cogeneration?* COGEN EUROPE, 2014. Disponível em <<http://www.cogeneurope.eu>>. Acesso em: 08 jul. 2014

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. *Tecnologia BIG-GT: energia a partir da gaseificação da biomassa da cana*. São Paulo: IEA, 2005. Disponível em <<http://www.iea.agricultura.sp.gov.br>>. Acesso em: 01 nov. 2019

B2BRAZIL. *Gaseificador de Biomassa*. São Paulo: Ecoholding, 2019. Disponível em <<https://b2brazil.com.br>>. Acesso em: 04 nov. 2019

FOELKEL, Celso. *Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade*. 2016

ANDRADE, Rubenildo Vieira. *Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental*. Itajubá: Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007

ARDILA, Yurany Camacho. *Gaseificação da Biomassa para a Produção de Gás de Síntese e Posterior Fermentação para Bioetanol: Modelagem e Simulação do Processo*. CAMPINAS: Faculdade Estadual de Campinas, 2015

CENBIO. *Estado da Arte da Gaseificação*. CONVÊNIO FINEP / CETERNERG. 2002.

BOYCE, Meherwan P. *Gas Turbine Engineering Handbook*. 2002

KAWASAKI. Disponível em < <https://global.kawasaki.com> >. Acesso em: 07 nov. 2019

SIEMENS. Disponível em < <https://assets.new.siemens.com> > Acesso em: 08 nov. 2019

LOO, Sjaak van e KOPPEJAN, Jaap. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. 2008

Goswami, D.Y. *Alternative Energy in Agriculture*. 1986

SANTOS, Nelson Oliveira. *Termodinâmica aplicada às Termelétricas, Teoria e Prática*. 2006

COMGAS. Disponível em <www.comgas.com.br>. Acesso em: 08 nov.2019

ÇENGEL, Y. A., B, M.A., 2006. *Termodinâmica*. 5ª ed. Mc Graw Hills.