

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE ELIAS ESPER

**APROVEITAMENTO DE BIOMASSA DE MADEIRA COMO FONTE DE
GERAÇÃO RENOVÁVEL DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

ALEXANDRE ELIAS ESPER

**APROVEITAMENTO DE BIOMASSA DE MADEIRA COMO FONTE DE
GERAÇÃO RENOVÁVEL DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba, sede Ecoville, como requisito parcial de obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Azevedo Cardoso

CURITIBA

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

APROVEITAMENTO DE BIOMASSA DE MADEIRA COMO FONTE DE GERAÇÃO RENOVÁVEL DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO

Por

ALEXANDRE ELIAS ESPER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 05 de dezembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Ivan Azevedo Cardoso, Dr.
UTFPR

Prof. Jair Ferreira de Almeida, Dr.
UTFPR

Prof. José Manoel Caron, Msc.
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

Dedico este trabalho à memória de meu avô materno que em minha vida foi filósofo, poeta e sábio, me mostrando que a busca do saber é para toda vida como ele o fez amparado à sua linda companheira, minha avó, quem me fez ver a beleza nisso tudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me proporcionado em todo esse percurso experiências boas e ruins que me possibilitou crescer como pessoa.

Aos meus pais Walter e Maria Jacy pela vida.

Agradeço a minha família, em especial a minha amada esposa Mara Regina e meus lindos filhos, Bruno e Gabriel, eternas fontes de inspiração e alegria.

Aos meus amigos da universidade pelo companheirismo e confidências na batalha diante do inimigo comum.

A todos os meus professores que foram como o farol ao iluminar meu navegar na noite escura em mares desconhecidos, dentre estes ao meu orientador professor Ivan.

Em especial a STCP Engenharia de Projetos Ltda. por ter me incluído em seu programa de capacitação o qual muito me ajudou a conquistar este ideal de vida.

Por fim gostaria de agradecer a todos que não foram mencionados que me ajudaram direta ou indiretamente a chegar à conclusão desse curso. Muito obrigado por acreditarem em mim.

A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará
ao seu tamanho original.

(Albert Einstein)

RESUMO

ESPER, Alexandre Elias. **Aproveitamento de Biomassa de Madeira como Fonte de Geração Renovável de Energia: Estudo de Caso**. 2016. 62 f. Trabalho de Conclusão do Curso Superior de Engenharia Civil– Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A proposta deste trabalho foi estudar a viabilidade de se implantar um sistema de cogeração a partir de biomassa, utilizando o resíduo proveniente de uma indústria de desdobro primário de madeira (serraria). Esta indústria hipotética foi idealizada em operações com mesmo tipo e porte a já existentes na região sul do Brasil, que utilizam madeiras de reflorestamento como pinus e eucalipto.

Como as indústrias madeireiras utilizam vapor no processo de secagem da madeira serrada através da queima do resíduo em caldeiras sugere-se então inserir uma nova caldeira (vapor superaquecido), uma turbina e um gerador de forma a implantar uma cogeração para suprir a demanda de energia elétrica desta indústria e a obtenção de receita com a venda do excedente de energia gerada.

Para este estudo foram estabelecidas algumas premissas em relação à operação industrial e à necessidade de vapor para processo, principalmente utilizado para secagem da madeira em estufas a vapor. Na análise foi feito o balanço de massa para quantificar o resíduo disponível e dimensionar a caldeira e a turbina em função desta disponibilidade para definir a capacidade de geração de energia.

Com base nos cálculos da necessidade de energia da indústria pode-se avaliar o custo a ser evitado com a compra de energia elétrica da concessionária local e uma receita em função da venda do excedente de energia gerada na cogeração.

Através dos cálculos do valor presente, taxa interna de retorno e tempo de retorno do investimento foi possível verificar a viabilidade deste empreendimento.

Palavras-chave: Biomassa. Cogeração de Energia. Energia Renovável

ABSTRACT

ESPER, Alexandre Elias. **Wood Biomass Utilization as Renewable Generation Power Source: Case Study**. 2016. 62 f. Completion of the Course work of Civil Engineering-academic Department of construction, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016

The proposal of this work was to study the feasibility of implanting a cogeneration system from biomass, using the waste from a primary wood industry (sawmill). This hypothetical industry was conceived in operations of the same type and size already in the southern region of Brazil, which use reforestation woods such as pine and eucalyptus.

As wood industries use steam in the drying process of the lumber through the burning of the residue in boilers it is suggested to insert a new boiler (superheated steam), a turbine and a generator in order to implant a cogeneration to supply the energy demand Of this industry and obtaining revenue from the sale of surplus energy generated.

For this study, some premises were established in relation to the industrial operation and the need for steam to process, mainly used for drying the wood in steam greenhouses. In the analysis the mass balance was made to quantify the available residue and to size the boiler and the turbine in function of this availability to define the capacity of generation of energy.

Based on the calculations of the energy need of the industry one can evaluate the cost to be avoided with the purchase of electric power from the local concessionaire and a revenue from the sale of surplus energy generated in cogeneration. Through the calculations of the VPL, TIR of Payback, it was possible to verify the feasibility of this enterprise.

Keywords: Biomass. Cogeneration. Renewable energy.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Cogeração	22
Figura 2 - Diagrama Temperatura - Entropia do Ciclo Rankine.....	25
Figura 3 - Componentes da Cogeração	25
Figura 4 - Cogeração e o Ciclo de Rankine	26
Figura 5 - Tipos de Turbina a Vapor.....	27
Figura 6- Cogeração e a Retirada de Vapor para Processo Industrial.....	28
Figura 7 - Cogeração com extração de vapor para processo na turbina.....	28
Figura 8- Arranjo Físico Conceitual.....	35
Figura 9 - Fluxograma do Desdobro Adotado para as Toras de Pinus	38
Figura 10- Balanço de Massa.....	39
Figura 11 - Entrada e Saídas de Vapor na Turbina.....	45
Figura 12 – Fluxo de Caixa	50
Figura 13 – Análise de Sensibilidade em Relação ao Valor da Energia Elétrica.....	52

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Empresas de Porte Equivalente ao Estudo de Caso.....	31
Tabela 2 – Dados principais.....	36
Tabela 3 – Disponibilidade Operacional por Setor.....	39
Tabela 4 – Carga instalada da Serraria.....	41
Tabela 5 – Consumo de Energia.....	42
Tabela 6 – Tipo de Resíduo, Quantidade e Procedência.....	43
Tabela 7 – Premissas Adotadas.....	48
Tabela 8 – Estimativa de Investimento na Cogeração de Energia.....	48
Tabela 9 – Estimativa de Custos Anuais.....	49
Tabela 10 – Estimativa de Receitas Anuais.....	49
Tabela 11 – Fluxo de Caixa.....	50

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção de vapor x umidade (base úmida de combustível)	19
Gráfico 2 – Curva Pressão x Temperatura	29
Gráfico 3 – Curva Pressão x Volume específico	30
Gráfico 4 – Calor sensível, Latente e Total	30

LISTA DE SIGLAS

PCH's – Pequenas Centrais Hidrelétricas
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa
IEA – Instituto de Economia Agrícola
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
SIN – Sistema Interligado Nacional
COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica
INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina
MDF - *Medium Density Fiberboard*
HDF - *High Density Fiberboard*
OSB - *Oriented Strand Board*
LVL - *Laminated Veneer Lumber*
TMA – Taxa Média de Atratividade
TIR – Taxa Interna de Retorno
VPL – Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

SO_x – Óxidos de Enxofre
mW – Megawatt
kw – quilowatt
kVA – quilo volt ampere
kcal – quilocaloria
T-s – Temperatura versus entropia
 kg_v – quilo de vapor
 M_{cav} – massa de cavacos de madeira
 M_{vp} – massa de vapor
 M_a – massa de água
 η – rendimento
 D_{el} – demanda elétrica
P – potência elétrica
 F_p – fator de potência
 F_u – fator de utilização
 F_s – fator de simultaneidade
 C_{pa} – calor específico da água
 ΔT_a – variação de temperatura da água
 h_e – entalpia de entrada
 h_s – entalpia de saída
 h_p – entalpia de processo
 V_e – volume vapor de entrada
 V_s – volume vapor de saída
 V_p – volume vapor de processo
 Δh – variação de entalpias
 μ_t – eficiência da turbina
 μ_m – eficiência mecânica
 μ_g – eficiência do gerador
Hz – hertz
j – juros
n – tempo
D – despesa
US\$ - dólar americano
PJ – Pentajoules
 PC_l – Poder calorífico inferior
 PC_s – Poder calorífico superior
 PC_{ef} – Poder calorífico efetivo
CV – cavalo vapor
U – umidade
Q – energia (calor)
E – energia (elétrica)

CONVERSÃO DE UNIDADES

PRESSÃO

Pa	KPa	MPa	Bar	kgf/cm ²	PSI
1000	1	0,001	0,01	0,01	0,145

TEMPERATURA

K (Kelvin)	°C
1	-272,15

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	A BIOMASSA.....	17
2.2	PREPARO DA BIOMASSA.....	18
2.3	GERAÇÃO DE VAPOR	20
2.4	TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA	21
2.5	COGERAÇÃO COM TURBINAS A VAPOR	24
2.5.1	O Ciclo de Rankine	24
2.6	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO VAPOR	28
2.7	CARACTERIZAÇÃO INDUSTRIAL.....	31
2.8	PRINCIPAIS INDICADORES DA ANÁLISE ECONÔMICA.....	31
2.8.1	Valor de Presente Líquido (VPL).....	32
2.8.2	Taxa Interna de Retorno (TIR)	32
2.8.3	Tempo de Retorno do Investimento (Payback).....	32
3	METODOLOGIA	33
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA MODELO	34
3.1.1	Caracterização da Indústria	36
3.1.2	Descrição do Processo	36
3.1.3	Fluxo do Desdobro das Toras (Serraria).....	37
3.1.4	Balanço de Massa.....	38
3.1.5	Disponibilidade Operacional.....	39
3.1.6	Necessidade de Vapor para Processo (Secagem de Madeira).....	40
3.1.7	Necessidade de combustível para processo.....	40
3.1.8	Consumo de Energia	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	43
4.1.1	Mix de combustível (Biomassa de madeira de Pinus).....	43
4.1.2	Poder Calorífico dos Resíduos e Potenciais de Geração de Vapor	43

4.1.3	Cálculo do poder calorífico efetivo do mix de resíduos (base seca)	44
4.1.4	Quantidade de Vapor Gerado com o Resíduo Disponível	44
4.1.5	Quantidade de cavacos necessários para a matriz de combustíveis.....	45
4.2	ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA	47
4.2.1	Premissas Adotadas na Análise Econômica Financeira	48
4.2.2	Investimentos Necessários	48
4.2.3	Custos Envolvidos.....	49
4.2.4	Receitas Anuais	49
4.2.5	Fluxo de Caixa	49
4.2.6	Cálculo do VP. (Valor Presente)	50
4.2.7	Cálculo da T.I.R. (taxa interna de retorno)	51
4.2.8	Cálculo do Payback Nominal e Descontado	51
4.2.9	Consideração sobre a análise econômica	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	CONCLUSÕES.....	53
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	GLOSSÁRIO	57

1 INTRODUÇÃO

Na abordagem apresentada nesse trabalho espera-se obter subsídios que possam avaliar a vantagem sobre o ponto de vista econômico de se implantar uma cogeração de energia, com base em resíduos de madeira, em indústrias madeireiras em operação com consumo de vapor para processo e consumo expressivo de energia elétrica. Para tanto a pesquisa será direcionada a sistemas correntes de tecnologia de fabricação de equipamentos em seu estado da arte e com as tecnologias convencionais mais utilizadas.

O trabalho aqui apresentado leva em consideração a geração de vapor, através da queima do combustível nas fornalhas com grelhas das caldeiras e a utilização de turbinas a vapor para a geração da energia.

Para contextualizar considera-se um cenário mundial de redução de emissões nocivas ao meio ambiente e a busca constante por fontes de energia renovável e sustentável, onde seja possível a redução da utilização de combustíveis fósseis, o uso da energia pela humanidade tem sido repensado.

Dentro deste cenário a matriz energética brasileira baseada nas hidrelétricas e PCH's apresentam muitas vantagens por ser de fonte limpa e renovável e coloca o Brasil no cenário mundial em destaque em termos de emissões. No entanto, o aproveitamento hídrico exigindo a formação de grandes áreas inundadas está cada vez mais raro em função dos potenciais principais já terem sido aproveitados, o impacto ambiental provocado e a interferência nas comunidades afetadas. Isso tudo tem dificultado a implantação de novos projetos no Brasil.

Dentre as fontes de energia limpa e que causem menor impacto ao meio ambiente crescem as fontes eólica e solar. Os diversos levantamentos e estudos realizados e em andamento (locais, regionais e nacionais) têm dado suporte e motivado a exploração comercial dessas fontes no país, demonstrando ascensão nos últimos anos em uma realidade que veio para ficar. Esse crescimento de mercado fez com que a Associação Européia de Energia Eólica estabelecesse novas metas, indicando que, até 2020, a energia eólica poderá suprir 10% de toda a energia elétrica requerida no mundo. (3_____CENBIO, 2012).

Embora fontes renováveis, como biomassa, solar e eólica, venham a ocupar maior parcela na matriz energética mundial, o carvão deverá continuar sendo, por

muitas décadas, o principal insumo para a geração de energia elétrica, especialmente nos países em desenvolvimento (IEA, 1997). Para isso, no entanto, são necessários avanços na área de P&D (Pesquisa e desenvolvimento), visando a atender aos seguintes requisitos:

- i) melhorar a eficiência de conversão;
- ii) reduzir impactos ambientais (principalmente na emissão de gases poluentes);
- iii) aumentar sua competitividade comercial. Embora não sejam mutuamente excludentes, esses fatores são normalmente conflitantes, principalmente os itens ii e iii.

Recentemente, grandes esforços têm sido direcionados ao aproveitamento da energia solar no Brasil, particularmente por meio de sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando ao atendimento de comunidades isoladas da rede de energia elétrica e ao desenvolvimento regional.

Em relação ao consumo de combustíveis veiculares o Brasil possui o diferencial de utilizar o etanol e o biodiesel, o que tem contribuído em muito nas reduções comparativamente se a frota fosse totalmente atendida pela gasolina e o diesel. A utilização de veículos tipo “*flex fuel*” (que utilizam tanto gasolina quanto etanol) o consumo de etanol mais que dobrou nos últimos sete anos, superando os 60 milhões de litros em 2007 (Atlas ANEEL, 2008).

Outro aproveitamento interessante e com muito a ser explorado é o biogás, principalmente no agronegócio, nas estações de tratamento de esgoto e nos aterros sanitários.

No campo de energias sustentáveis, ou seja, fontes que são renováveis como o caso da biomassa de origem na cana de açúcar e na madeira, principalmente nas atividades industriais, onde são resíduos de processos industriais que se não aproveitados seriam um passivo ambiental. Seu aproveitamento para geração de energia pode transformar as indústrias autossuficientes na produção da energia consumida em seus processos e até gerar receita com a venda do excedente para o sistema interligado nacional (SIN).

A madeira tem sido, ao longo dos anos, uma tradicional e importante matéria prima para a produção de energia. As estimativas mais aceitas indicam que representa cerca de 13% do consumo mundial de energia primária. Um dos mais recentes e detalhados estudos publicados a este respeito no mundo, o *Survey of*

Energy Resources, e no Brasil, respondeu por 12% do total da oferta interna de energia em 2007 (Atlas ANEEL, 2008).

Já existem florestas plantadas voltadas exclusivamente para a produção de energia, as chamadas florestas energéticas. Na maioria fazem parte de programas de recuperação de áreas degradadas ou com a função de fornecimento de energia para complexos industriais e comunidades locais.

As florestas plantadas em termos de emissão de gás carbônico apresenta balanço praticamente nulo (devido à absorção de carbono pela fotossíntese), as demais emissões, quando comparada aos combustíveis fósseis, também apresentam vantagens, pois as emissões de SO_x (óxidos de enxofre) são desprezíveis. Outra vantagem da queima da madeira está na baixa emissão de hidrocarbonetos e dióxido de carbono em comparação aos combustíveis fósseis (TOLMASQUIM, 2003).

Algumas regiões obtêm grande parte da energia térmica e elétrica que consomem da biomassa, principalmente do subgrupo madeira, o mais tradicional dos resíduos agrícolas. A característica comum dessas regiões é a economia altamente dependente da agricultura. Estudos mostram que, em 2005, a Ásia foi o maior consumidor mundial, ao extrair da biomassa de madeira 8.393 PJ (petajoules), dos quais 7.795 PJ foram provenientes da lenha, sendo a segunda posição foi da África, com 6.354 PJ, dos quais 5.633 PJ da lenha (³_____CENBIO, 2012).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a viabilidade do aproveitamento de biomassa de madeira como fonte de energia renovável.

1.1.2 Objetivos específicos

Para cumprimento do objetivo geral foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Utilizar princípios da termodinâmica para caracterizar os combustíveis analisados.
- Comparar o poder calorífico inferior (PC_i) e superior (PC_s) com outros combustíveis.
- Analisar a influência da umidade na biomassa (madeira).

- Analisar tecnologias de gaseificação, biodigestão e pirólise da biomassa.
- Mensurar investimentos e custos para preparar a biomassa visando melhorar a eficiência.
- Comparar as alternativas visando a melhor opção para a indústria analisada.
- Análise de custos de aproveitamento de energia de madeira em uma empresa hipotética cujo modelo é compatível com diversas empresas madeireiras da região sul do Brasil.

1.2 JUSTIFICATIVA

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição aos derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina. Mas, se atualmente a biomassa é uma alternativa energética de vanguarda, historicamente tem sido pouco expressiva na matriz energética mundial (Atlas ANEEL, 2008).

Nas indústrias de base florestal, onde os setores de produção de papel e celulose, painéis reconstituídos de madeira (MDF, HDF, OSB, LVL), compensados, serrarias e laminadoras, há um expressivo consumo de energia elétrica e de vapor para os processos industriais e é de suma importância o aproveitamento dos resíduos para fins energéticos, se não aproveitados representam um passível ambiental de difícil resolução.

Dependendo do balanço energético é possível a autossuficiência de energia elétrica e até o incremento de receita da indústria pela venda da energia excedente e disponibilizada na rede (TOLMASQUIM, 2003).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A BIOMASSA

As fontes renováveis de energia que poderão ser utilizadas para substituir as de origem fóssil, segundo CARIOCA E ARORA, 1984 devem satisfazer os seguintes requisitos:

- Não provocar danos à ecologia;
- Competir economicamente com as fontes tradicionais de energia;
- Ser produzida em nível local ou regional;
- Contar com a aceitação social;
- Não competir com a produção de alimentos.

O termo biomassa refere-se a toda a matéria orgânica proveniente dos reinos animal e vegetal. Considerando-se a utilização da biomassa para fins energéticos, a classificação desses recursos pode ser feita da seguinte forma:

- Recursos florestais, representadas pelas florestas naturais e plantadas;
- Culturas energéticas envolvendo espécies:
 - Sacarídeas (cana de açúcar, sorgo sacarino e beterraba);
 - Amiláceas (mandioca, sorgo granífero, batata doce e milho);
 - Oleaginosas (soja, dendê, girassol, mamona, amendoim, colza, algodão, babaçu e coco).
- Fitomassa aquática;
- Resíduos agropastoris;
- Resíduos orgânicos industriais;
- Resíduos urbanos sólidos e líquidos;
- Outros tipos de biomassa.

Neste trabalho o enfoque principal são os recursos florestais, que constituem a forma mais abundante de biomassa na Terra.

Notadamente, a lenha já liderou no passado a nossa principal fonte de energia primária; com a penetração do petróleo na matriz energética brasileira, seu uso foi restringido, mas retomado em estudos e utilização a partir da crise do petróleo na década de 70.

Para entendimento da biomassa de madeira como combustível deve-se considerar sua composição elementar em geral, de 50% de carbono, de 44% de

oxigênio e 6% de hidrogênio, apresentando um poder calorífico superior da ordem de 5000 kcal/kg (CARIOCA E AURORA, 1984). Portanto, com características importantes sob o ponto de vista energético.

2.2 PREPARO DA BIOMASSA

A utilização da biomassa em processos termoquímicos requer na maioria das vezes uma etapa de preparação dos materiais tendo em vista uma melhor adequação das suas propriedades e/ou características a um determinado processo.

Dentre as várias operações unitárias relacionadas com o preparo de biomassa, destacam-se: a secagem, a redução de tamanho em moinhos ou picadores, classificação, densificação (peletização, briquetagem e extrusão), além da separação dos componentes indesejáveis.

A etapa de preparação é da maior importância uma vez que ela é responsável por uma fração considerável dos custos de equipamentos e manutenção. Assim, a utilização em larga escala de resíduos agrícolas, lenha ou qualquer tipo de biomassa em gaseificadores quase sempre requer uma etapa de secagem para que o processo possa ocorrer de forma conveniente. A utilização da biomassa com umidade superior a 68 % é indesejável, tendo em vista que a partir desse ponto grande quantidade de energia será gasta para evaporar água. Costuma-se geralmente realizar uma secagem natural do material antes da secagem propriamente dita, para em seguida se utilizar o calor residual dos gases de exaustão numa fase complementar. (CARIOCA E ARORA, 1984).

A qualidade da biomassa de origem na madeira está associada à presença de sílica (areia) que prejudica as grelhas da fornalha da caldeira e principalmente ao teor de umidade.

A partir de aproximadamente 68% de umidade o combustível não queima sem a utilização de combustível auxiliar, ou seja, a umidade é fator extremamente importante na combustão.

Mesmo com umidades abaixo da umidade limite de 68 % prejudica a combustão uma vez que grande parte da energia será dispensada na evaporação da água da biomassa (madeira).

No Gráfico 1 é demonstrada a umidade limite na qual será necessário a utilização de combustível auxiliar para a combustão.

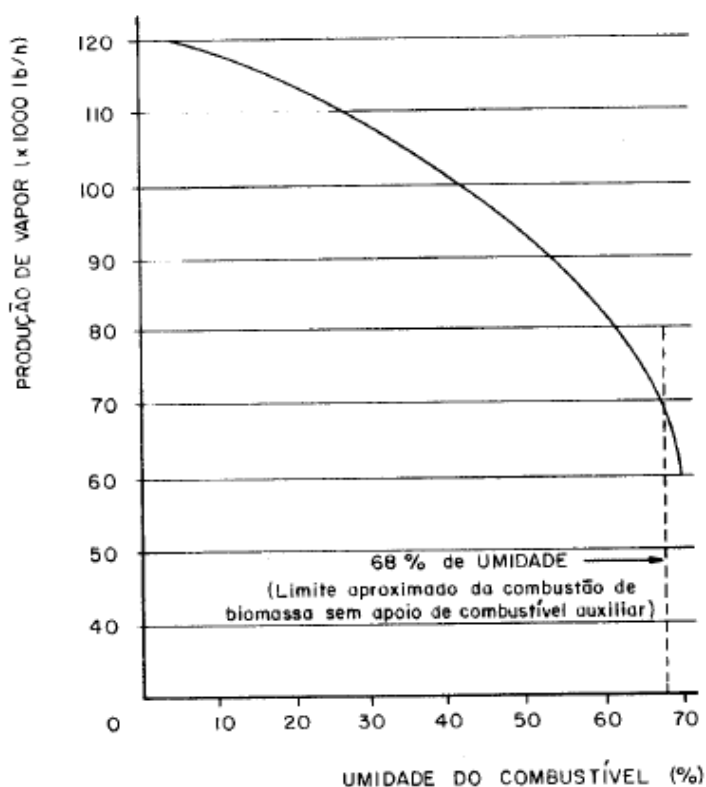


Gráfico 1 – Produção de vapor x umidade (base úmida de combustível)

Fonte: Otimização Energética de Caldeiras a Lenha Através da Pré-secagem de Cavacos Utilizando Gases Efluentes da Combustão (IPT – 1986) – Roberto de Aguiar Peixoto e Lestes Amaral Junior

Segundo (MENDES, 1996) a madeira é um material higroscópico, ou seja, ela pode absorver ou liberar umidade dependendo do seu teor de umidade e das condições do ambiente, portanto, se muito seca ela passa a absorver umidade pelo processo de absorção, buscando ficar em umidade de equilíbrio com o meio. O teor de umidade da madeira quando ela atinge o equilíbrio com o ambiente é conhecido como teor de umidade de equilíbrio. Na madeira há a água livre e a água presa, sendo a livre, aquela água que fica nos poros e mais fácil de ser retirada, e a presa fica dentro das paredes da célula e o teor de umidade nesse ponto é conhecido como ponto de saturação das fibras e gira entre 24 a 30%. Para retirar essa água o sistema natural de secagem não é eficiente, sendo necessário utilizar o sistema de secagem artificial, ou seja, com utilização de secadores.

2.3 GERAÇÃO DE VAPOR

Os componentes principais de um sistema de geração de vapor são basicamente:

- Fornalha, local onde ocorre a queima do combustível através da mistura ar + combustível que ocorre a temperaturas de 900 a 1400 °C;
- Caldeira onde ocorre a mudança de fase líquida gasosa;
- Superaquecedor que tem a função de aumentar a temperatura do vapor;
- Economizador que pré aquece a água aumentando o rendimento e reduzindo o choque térmico nos componentes do sistema;
- Aquecedor de ar que faz o aproveitamento do calor residual pode variar de 120 a 300°C, aumentando o aproveitamento térmico da unidade geradora.

O estado da arte na produção de vapor para cogeração de energia, conforme BEGA, 2003, utiliza nas caldeiras controles e medições na alimentação do combustível, entrada de ar, nível da caldeira, pressão, temperaturas e os gases da chaminé. Para isso possuem orifícios, bocais, Venturi, aerofólio, Pitot, Pitot Venturi e micro Venturi.

As caldeiras mais utilizadas são:

- Fogotubulares ou Flamutubulares, onde os gases quentes passam por dentro da tubulação e a água a ser aquecida por fora. Utilizada em pressões até 10 kgf/cm² (150 PSI) e capacidade até 10 ton./h.
- Aquatubulares, onde a água é que passa por dentro dos tubos e os gases quentes por fora, utilizadas para pressões e capacidades maiores que 10 kgf/cm² (150 PSI) e 10 ton/h, respectivamente.

Em relação à combustão pode-se classificar em:

- Combustão completa: $O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$
 $C \rightarrow CO_2$
- Combustão incompleta: $O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$
 $C \rightarrow CO_2$
 CO
 H_2
 C

As caldeiras possuem suas fornalhas ou queimadores projetados para atender as características da biomassa em seu estado físico de forma a se obter a melhor eficiência da queima com a menor geração de cinzas e particulados.

O mercado atual de fornecimento de caldeiras dispõe de diversas alternativas de queimadores, sendo as principais tecnologias disponíveis (TOLMASQUIM, 2003):

- Queima em grelha fixa: queima incompleta;
- Queima em grelha móvel: com automação torna-se eficiente;
- Queima em suspensão: Utilizada para resíduos como palha de arroz;
- Queima em leito fluidizado: leito formado por areia + ar;
- Reatores de combustão pirolítica: antecedido por gaseificação.

As grelhas de suspensão possuem uma gama grande de fornecedores os sistemas de leito fluidizado e combustão pirolítica são mais restritos.

2.4 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA

A produção de eletricidade a partir de biomassa está associada à necessidade ou não de conversão da biomassa antes de sua combustão. Em um primeiro grupo baseia-se em combustão direta da biomassa, onde é queimada em conjunto com um combustível fóssil em uma queima conjunta ou combinada (*co-firing*) e em um segundo grupo na queima de combustíveis líquidos ou gasosos derivados da biomassa, por gaseificação, biodigestão e na pirólise da biomassa (TOLMASQUIM, 2003).

Os combustíveis derivados da biomassa apresentam algumas vantagens, por apresentarem melhor eficiência de conversão da biomassa em eletricidade, maior eficiência de combustão e à maior eficiência de equipamentos. Os motores de combustão interna (MCI) e as turbinas a gás (TG) em resposta a melhor combustão e maior eficiência apresentam menores emissões atmosféricas.

Conforme estudos feitos na Europa Ocidental no fim dos anos 1990 (TOLMASQUIM, 2003) o estado da arte em geração de energia a partir de biomassa, com ciclos de vapor de pequena capacidade, sofre com os efeitos de escala, afetando muito a viabilidade dos sistemas de cogeração abaixo de 5 MW.

O sistema de geração térmica por mais eficiente que seja não atinge patamares maiores que 40%, pois grande parte da energia é transformada em calor e perdida. A grande vantagem da cogeração é que como as indústrias necessitam

do vapor para seus processos internos a geração propriamente dita de energia elétrica pode ser feita com vapor em alta pressão para movimentar a turbina e após ser utilizado o vapor no processo em pressões menores. Com isso pode-se chegar a uma eficiência de até 85% do aproveitamento da energia (INEE, 2016). No Brasil em indústrias onde é utilizada a biomassa residual de processos fabris os sistema de vapor de pequena capacidade tem apresentado viabilidade econômica em unidades de 2 a 5 MW, principalmente nas usinas de açúcar e álcool no processamento da cana-de-açúcar e nas indústrias de base florestal no processamento da madeira.

A cogeração é uma solução de engenharia, aplicável para determinados usuários de energia, que pode, em condições adequadas viabilizar economicamente a auto produção de energia e redução dos custos operacionais. Na língua inglesa CHP (*Combined Heat and Power*) a cogeração é usualmente entendida como a geração simultânea e combinada de energia térmica e elétrica a partir de uma mesma fonte com o maior aproveitamento da energia contida nesta fonte Patermann, 2005).

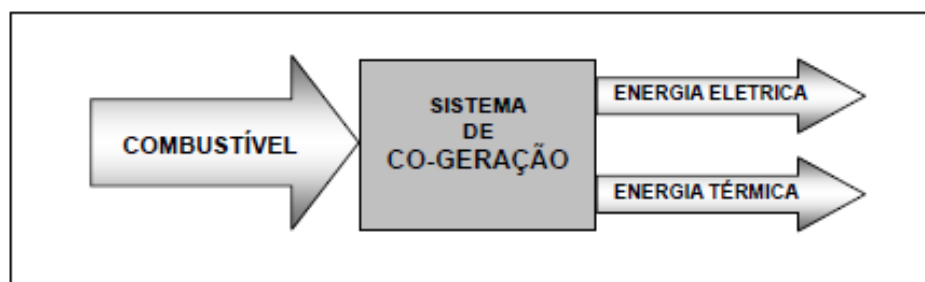


Figura 1 - Cogeração

Fonte: Apostila de Co-geração – Curso de engenharia de equipamentos Professor Newton Paterman Brasil (2005)

Segundo o Atlas da ANEEL, 2008, dentre as tecnologias de aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio da combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra etc.), de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação).

Os principais processos de conversão da biomassa em energéticos e suas tecnologias de aproveitamento são:

Gaseificação: como o próprio termo indica, gaseificação é um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades

inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). Há vários tipos de gaseificadores, com grandes diferenças de temperatura e/ou pressão. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. O gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo, particularmente se é ar ou oxigênio que está sendo usado na oxidação.

Pirólise: a pirólise ou carbonização é o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (carvão, essencialmente). O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300°C e 500°C), na “quase-ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maior que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas. Além de gás combustível, a pirólise produz alcatrão e ácido pirolenhoso.

Transesterificação: transesterificação é um processo químico que consiste na reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo (metóxido ou etóxido), oriundo da reação entre álcoois (metanol ou etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou de potássio). Os produtos dessa reação química são a glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos (biodiesel). O biodiesel tem características físicoquímicas muito semelhantes às do óleo diesel e, portanto, pode ser usado em motores de combustão interna, de uso veicular ou estacionário.

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras etc. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a cogeração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética. Espera-se que o desenvolvimento de novas tecnologias, como o acoplamento de sistemas de gaseificação e a integração da pirólise às turbinas a gás, aumente substancialmente a eficiência termodinâmica das plantas e reduza os custos de capital e geração (Atlas ANEEL, 2008). No Brasil em pequenas gerações são muito usados os motores a vapor, tipo pistão (locomóveis) que utilizam o princípio das locomotivas a vapor, motores *Stirling* (motores de combustão externa) que opera

com gama de combustíveis sólidos e líquidos e as micro turbinas a gás, que operam na faixa de potência de 15 a 300 kW.

2.5 COGERAÇÃO COM TURBINAS A VAPOR

2.5.1 O Ciclo de Rankine

O Ciclo Rankine é o ciclo ideal para uma unidade motora simples a vapor e compreende os processos termodinâmicos básicos abaixo listados e apresentados na Figura 2 no diagrama T-s (temperatura *versus* entropia).

A entropia, unidade [J/K] (joules por kelvin), é uma grandeza termodinâmica que mensura o grau de irreversibilidade de um sistema, encontrando-se geralmente associada ao que denomina-se por "desordem" de um sistema termodinâmico. Em acordo com a segunda lei da termodinâmica, trabalho pode ser completamente convertido em calor, e por tal em energia térmica, mas energia térmica não pode ser completamente convertida em trabalho. Com a entropia procura-se mensurar a parcela de energia que não pode mais ser transformada em trabalho em transformações termodinâmicas à dada temperatura (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005).

Ao sofrerem mudança de temperatura, os corpos alteram o estado de agitação de suas moléculas. Então ao considerarmos esta agitação como a desordem do sistema, podemos concluir que:

- quando um sistema recebe calor $Q > 0$, sua entropia aumenta;
- quando um sistema cede calor $Q < 0$, sua entropia diminui;
- se o sistema não troca calor $Q = 0$, sua entropia permanece constante.

Portanto, conforme demonstrado na Figura 2, o ciclo de Rankine em seus estágios ficam assim definidos:

- 1 – 2 : Processo de bombeamento adiabático reversível;
- 2 – 3 : Processo de troca de calor a pressão constante, na caldeira;
- 3 – 4 : Processo de expansão adiabática reversível (turbina ou pistão);
- 4 – 1 : Processo de troca de calor a pressão constante, no condensador;

As indicações Q_H e Q_L significam, respectivamente, a transferência de calor do reservatório de alta temperatura para o fluido de trabalho e do fluido de trabalho para o reservatório de baixa temperatura.

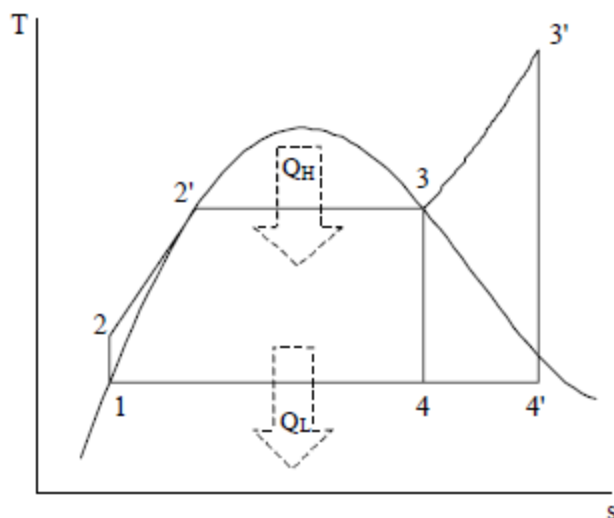


Figura 2 - Diagrama Temperatura - Entropia do Ciclo Rankine
Fonte: CORRÉA NETO

O Ciclo de Rankine inclui também a possibilidade de superaquecimento do vapor, como o ciclo 1-2-3'-4'.

Na Figura 3 o mesmo ciclo é demonstrado em termos dos componentes da cogeração, ou seja, equipamentos responsáveis pela formação e continuidade do ciclo.

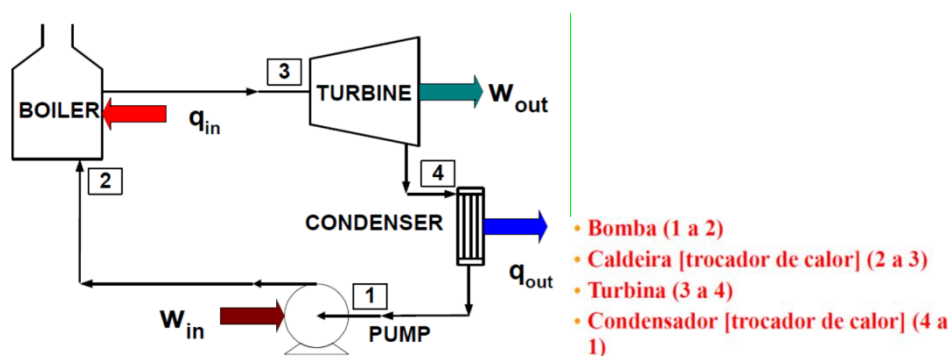


Figura 3 - Componentes da Cogeração

Fonte: Apostila de Co-geração – Curso de engenharia de equipamentos – Autor: Prof. Newton Pateman, Brasil (2005)

Na Figura 4 são colocados lado a lado para demonstrar a correlação da cogeração com o ciclo de Rankine. Esse seria apenas um exemplo diante das mais diferentes formas que podem ocorrer a correlação, no entanto, a apresentada é a mais comum dentro do conceito didático e utilizado neste trabalho.

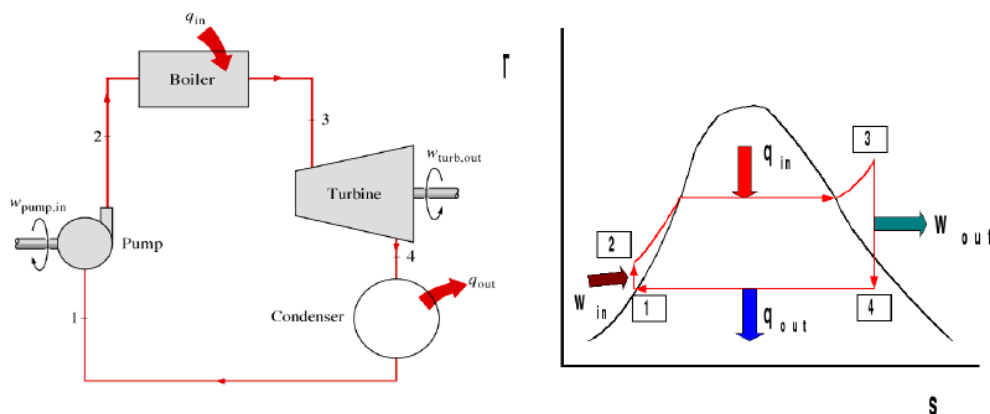


Figura 4 - Cogeração e o Ciclo de Rankine

Fonte: Apostila de Co-geração – Curso de engenharia de equipamentos – Autor: Prof. Newton Pateman, Brasil (2005)

O acionamento da turbina se produz pela expansão do vapor de alta pressão procedente de uma caldeira convencional. Essa expansão se realiza nos bocais fixos e nas palhetas móveis, montadas nos rotores, em um ou mais estágios, onde a energia contida no vapor se transforma primeiro, em energia cinética e, em seguida, em energia mecânica, impulsionando as palhetas. Embora a energia mecânica gerada receba as mesmas aplicações que no caso da turbina a gás, o vapor de baixa ou de média pressão rejeitado pelas turbinas poderá ser aproveitado em um processo industrial quando o mesmo necessitar de vapor ou de energia térmica no nível relativamente baixo de temperatura, geralmente inferior a 200°C.

Duas instalações com turbinas a vapor - uma operando como uma central de geração elétrica e a outra operando em um sistema de geração de vapor para processo (secagem de madeira em estufas). O balanço térmico correspondente, para uma mesma quantidade de combustível fornecida, indica que o primeiro sistema consegue uma eficiência elétrica de 28%, o que resulta num total de perdas de 72%.

De outro lado, ao se utilizar o vapor de escape da turbina, a eficiência elétrica pode se reduzir um pouco, assumida neste caso em 20%, mas as perdas totais se reduzem a 18%, devido à utilização do vapor de escape em um processo industrial, totalizando uma eficiência energética global de 82%.

A turbina de vapor como elemento motor é mais simples que a turbina a gás, embora, quando se consideram os restantes elementos necessários para realizar o ciclo (caldeira, trocadores de calor, bombas, condensador, desaeradores, etc.), a instalação, é sem dúvida, mais pesada e complexa. De outro lado, é uma tecnologia

mais conhecida e bem dominada, com muitos fabricantes de equipamentos, particularmente na faixa de potência dos sistemas de cogeração.

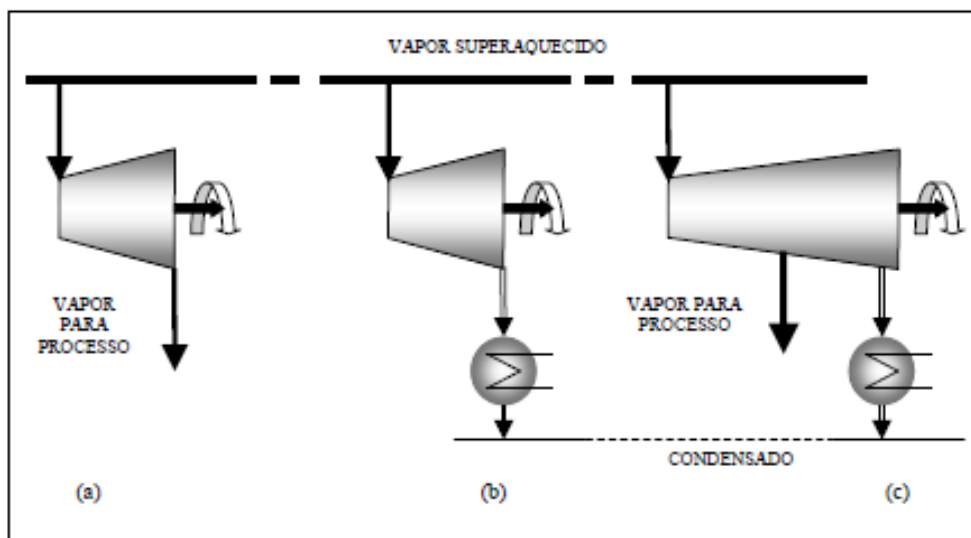


figura 14

- a- turbina de contrapressão
- b- turbina de condensação
- c- turbina de condensação com extração

Figura 5 - Tipos de Turbina a Vapor

Fonte: Apostila de Co-geração – Curso de engenharia de equipamentos – Autor: Prof. Newton Paterman, Brasil (2005).

Ainda que os fabricantes procurem reduzir seus custos mediante a padronização das unidades, existe uma ampla variedade de tipos e modelos de turbinas a vapor, cada qual mais adequado a uma aplicação específica, com diversas opções quanto a número de estágios, sistema de controle e tecnologia de materiais e de fabricação. Uma característica importante destes sistemas de cogeração refere-se à sua capacidade de utilizar qualquer combustível, desde resíduos industriais, como bagaço de cana, até combustíveis mais nobres, como o gás natural. Outro aspecto positivo desta tecnologia é o fato de o vapor ser largamente empregado como vetor energético para aquecimento em processos industriais; nesse caso, já disponível no escape das turbinas.

Na Figura 6 é demonstrado o sistema de cogeração e a retirada de vapor para processo industrial da forma conceitual e em maiores detalhes na Figura 7 o sistema conforme a cotação da Sólida Energia para a composição dos investimentos previstos para este trabalho.

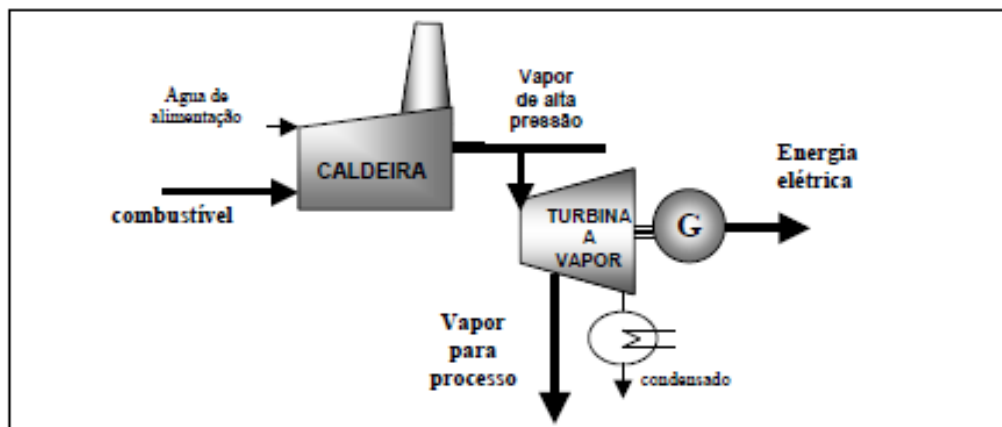


Figura 6- Cogeração e a Retirada de Vapor para Processo Industrial

Fonte: Apostila de Co-geração – Curso de engenharia de equipamentos – Autor: Prof. Newton Pateman, Brasil (2005)

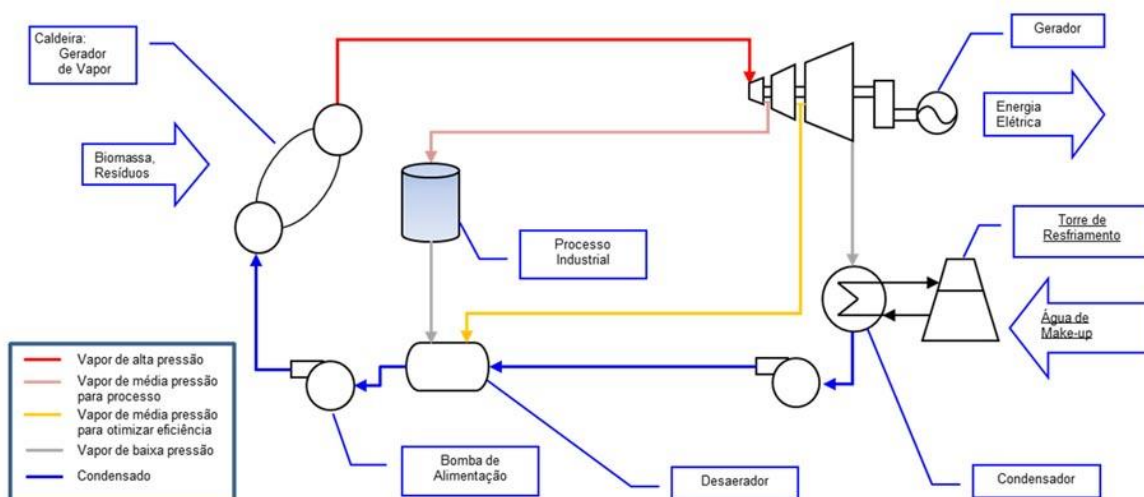


Figura 7 - Cogeração com extração de vapor para processo na turbina

Fonte: ⁶ Base Sólida Energia (2012)

2.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO VAPOR

O vapor gerado na caldeira segue algumas características peculiares ao seu comportamento físico e estão relacionados a temperatura, pressão e densidade.

O vapor utilizado para a movimentação da turbina é superaquecido e o de processo vapor saturado. Nos gráficos a seguir ilustram essas características das quais fundamentais para o melhor aproveitamento energético.

No Gráfico 2 é demonstrado a relação entre pressão e temperatura, dados fundamentais para a determinação da entalpia do vapor no cálculo da demanda energética.

A entalpia é a quantidade de energia contida em uma determinada substância que sofre reação, ela calcula o calor de um sistema, é a forma mais usada de expressar o conteúdo calorífico de um componente em uma reação química. A variação da Entalpia está na diferença entre a entalpia dos produtos e a dos reagentes, sendo assim, o calor de uma reação corresponde ao calor liberado ou absorvido em uma reação, e é simbolizado por “h” Não há como determinar a quantidade de energia em uma substância, mas podemos conhecer e medir sua variação. Para isso utiliza-se a fórmula: $\Delta h = h \text{ final} - h \text{ inicial}$ (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005).

No Gráfico 2 demonstra-se a variação da pressão manométrica conforme o aumento da temperatura e vice-versa.

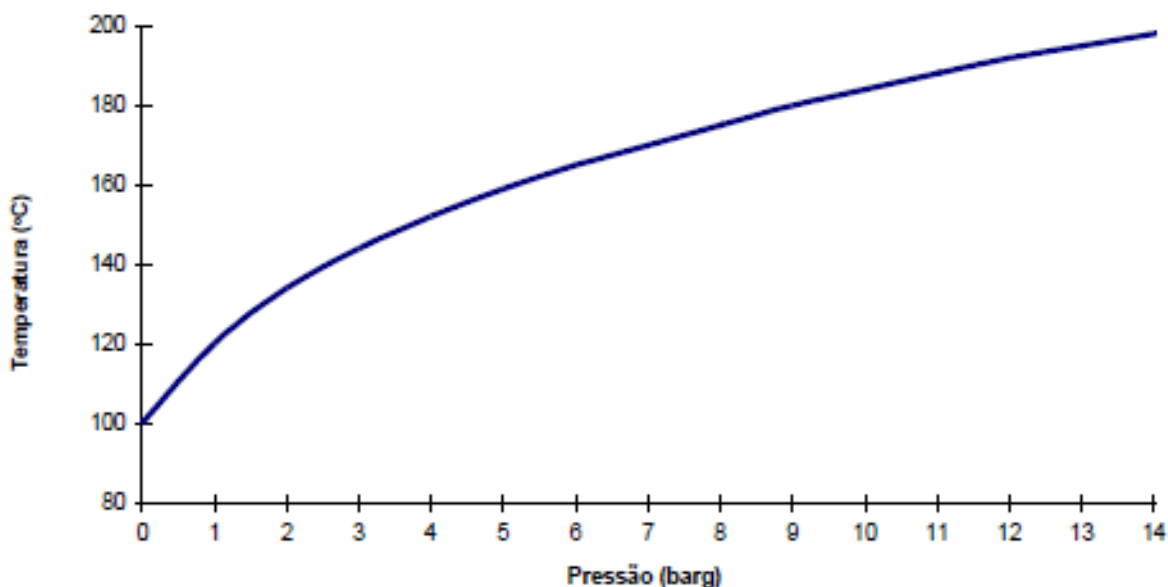


Gráfico 2 – Curva Pressão x Temperatura

Fonte: Apostila de Eficiência Energética em Sistemas de Vapor (2005)

No Gráfico 3 é demonstrado a relação entre pressão e volume específico, dados fundamentais para a determinação da escolha da turbina.

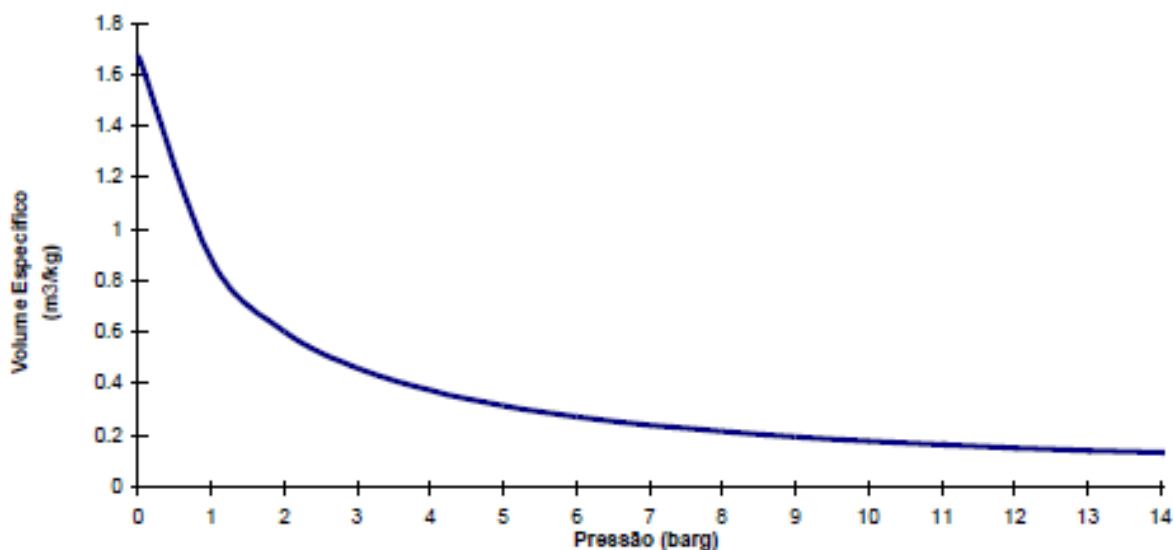


Gráfico 3 – Curva Pressão x Volume específico
 Fonte: Apostila de Eficiência Energética em Sistemas de Vapor (2005)

No Gráfico 4 é demonstrado as mudanças de estado do líquido, vapor saturado e vapor superaquecido.

Temperatura

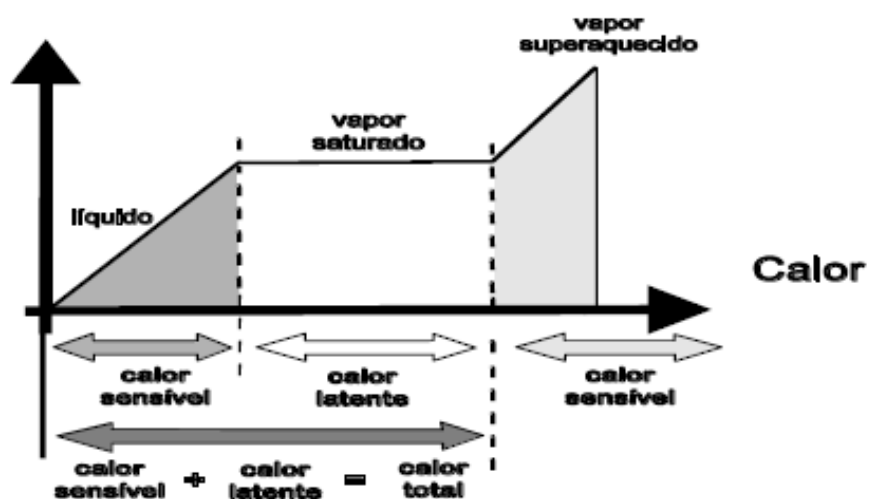


Gráfico 4 – Calor sensível, Latente e Total
 Fonte: Apostila de Eficiência Energética em Sistemas de Vapor (2005)

A utilização do vapor superaquecido é fundamental na cogeração, pois se obtém um vapor de temperatura e pressão maiores e de melhor qualidade, menos agressivo para a turbina, uma vez que carrega menos água líquida do que o vapor saturado.

2.7 CARACTERIZAÇÃO INDUSTRIAL

O modelo proposto neste trabalho considera como referência indústrias de processamento de madeira de porte médio localizadas na região sul do Brasil. Na Tabela 1 são listadas as empresas equivalentes sob o aspecto do consumo de madeira em toras durante o ano e o consumo de energia elétrica para manter a operação industrial. Na última coluna da Tabela 1 é feita uma relação entre o consumo de toras e a energia elétrica gerando um fator comparativo de kWh por tonelada de madeira processada.

Tabela 1 – Empresas de Porte Equivalente ao Estudo de Caso

Empresa	Cidade	UF	Madeira em toras (t/ano)	Consumo de Energia Elétrica (kWh/ano)	Relação energia/madeira (kWh/t)
Braspine	Jaguariaíva	PR	316.800	4.646.400	15
Imaribo	Monte Carlo	SC	163.200	1.858.560	11
Sólida Brasil madeira	Rio Negrinho	SC	528.000	4.842.720	09
Frame	Caçador	SC	87.240	1.980.000	23
Sincol	Caçador	SC	163.200	5.111.040	31
Mademafra	Mafra	SC	24.000	508.474	21
Temasa	Caçador	SC	66.000	2.257.200	34
AB Laminados	Caçador	SC	81.600	2.787.840	34
Vonsovicz	Mandirituba	PR	38.400	381.535	10
Cisframa	Canoinhas	SC	144.000	4.224.000	29
Médias			161.244	2.859.777	22

Fonte: Dados Autor (2013)

Como demonstrado ao final desta tabela obtém-se uma média de 22 kWh/t de madeira processada, mais adiante no capítulo 3 o modelo industrial pode ser comparado uma vez que considera um processamento de 150.000 t de toras e um consumo energético de 2.888.685 kWh/ano o que perfaz uma relação de 19 kWh/t, ou seja, muito próximo da média encontrada considerando as indústrias citadas.

2.8 PRINCIPAIS INDICADORES DA ANÁLISE ECONÔMICA

A metodologia de avaliação econômica difere de acordo com o perfil do investidor e seus objetivos, mas para todos constitui um conjunto de indicadores que permitem a comparação por diferentes critérios.

O Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Tempo de Retorno do Investimento (Payback) estão entre os principais indicadores considerados na análise de projetos.

2.8.1 Valor de Presente Líquido (VPL)

Valor Presente Líquido é a equivalência monetária hoje da soma dos fluxos de caixa futuros, depois de descontado o imposto de renda, de todos os anos de duração do projeto. O método de VPL é um valioso indicador porque reconhece o valor do dinheiro no tempo. Projetos que apresentam VPL positivo são atraentes.

2.8.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Taxa Interna de Retorno (TIR) é definida como a taxa de desconto que iguala a zero o VPL dos fluxos de caixa do projeto. A TIR é calculada para determinar se a rentabilidade do projeto excede uma mínima taxa de retorno aceitável, freqüentemente chamada de taxa de atratividade. A vantagem da TIR é que, diferentemente do VPL, seus resultados de porcentagem permitem comparar projetos de tamanhos diferentes com facilidade.

2.8.3 Tempo de Retorno do Investimento (Payback)

Um cálculo do tempo de retorno do investimento ou payback compara as rendas com os custos e determina o período de tempo exigido para recuperar o investimento inicial. Um período de payback simples é calculado freqüentemente sem levar em conta o valor do dinheiro no tempo. Este indicador é freqüentemente usado para analisar oportunidades de investimento que oferecem benefícios incrementais e aplicações de uso final.

3 METODOLOGIA

O estudo de caso toma como base uma indústria idealizada com base em indústrias semelhantes na região sul do Brasil, de produtos de origem madeireira; busca-se verificar o consumo de vapor e energia elétrica e a comparação relacionando custos e as tarifas de energia pela concessionária obtendo-se assim uma análise completa da viabilidade esperada na utilização da energia elétrica gerada a partir dos resíduos da madeira residual do processo fabril.

Neste trabalho é feita uma análise da viabilidade econômica à partir de um modelo de indústria madeireira peculiar às muitas instaladas na região sul do Brasil no desdobro primário (serraria) de pinus e eucalipto. A proposta é que produza madeira serrada seca em processo artificial, ou seja, em estufas de secagem que utilizem vapor produzido em caldeira com queima dos resíduos do processo industrial próprio, sendo estes resíduos: cascas, maravalhas, pó de serra e cavacos oriundos de costaneiras e destopos (picados em picador).

Para atingir o resultado esperado será feita uma caracterização da indústria considerando o volume de madeira processada anualmente, o produto a ser produzido e comercializado e a capacidade instalada de vapor e consumo de energia elétrica adquirido da concessionária local.

Essa indústria terá a agregação de um sistema de cogeração de energia elétrica de forma a melhorar a eficiência onde será gerada a energia com pressão maior na turbina com saída de vapor para o processo de secagem de madeira.

Os investimentos avaliados são basicamente na aquisição e instalação de caldeira, turbina e gerador.

Na análise econômica financeira verificar o tempo de retorno do investimento através da economia de energia elétrica utilizada pela indústria e na receita gerada pela venda do excedente para a concessionária de energia.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL através da Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015 que permite a conexão em sincronismo com a rede elétrica de fontes geradoras com potência de até 5000 kW. Esse tipo de conexão funciona na modalidade de compensação de energia, ou seja, ora a geração injeta o excedente de energia na rede e ora consome da rede a energia que falta. Neste caso o cliente paga a energia, se houver débito, ou fica com o crédito disponível por até 3 anos.

Para proceder a avaliação econômico-financeira dos ciclos termodinâmicos propostos, foram utilizadas as variáveis: preço de energia segundo os preços informados pela concessionária período de julho de 2016 e taxa de juros praticados no mercado.

Os custos de investimentos foram estimados a partir de propostas técnicas e comerciais fornecidas pela Base Sólida Energia ⁽⁶⁾ e Benecke ⁽⁷⁾.

O poder calorífico dos resíduos foi determinado pela literatura e a umidade dos resíduos foi determinada segundo artigos específicos relacionados às espécies de reflorestamento da região sul do Brasil.

Para elaboração e análise das alternativas de ciclos termodinâmicos foram utilizados as 1ª e 2ª leis da termodinâmica e o gráfico de Mollier, segundo metodologia desenvolvida por Van Wylen *et al* (1998).

No estudo da análise econômica financeira utilizou-se a taxa interna de retorno (TIR) e a metodologia de análise do valor presente (VPL) e o Payback (tempo de retorno do investimento). Estes indicadores e instrumentos de análise de custos ajudaram a orientar as conclusões sobre a viabilidade de implantação do projeto.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA MODELO

A indústria adotada como modelo para este estudo é voltada para a produção de madeira serrada e beneficiada de pinus para atender o mercado interno e exportação. Os produtos podem ser destinados a outras indústrias de manufatura como portas, janelas, móveis, embalagens e construção civil. Trata-se de uma indústria fictícia, porém comparável por semelhança a muitas existentes no Brasil pelo ramo de atividade, porte e produção.

O porte adotado é médio quando comparado às indústrias com o mesmo perfil na região sul do Brasil.

Na Figura 8 é demonstrado o arranjo físico conceitual desta indústria composta pelos seguintes setores:

- 1 – portaria (balança de caminhões);
- 2 – pátio de toras
- 3 – sala de afiação (serras de fita e circulares)
- 4 - escritório, instalações sanitárias;
- 5 - serraria (desdobro primário de madeira)

- 6 – caldeira para processo;
- 7 – silo de resíduos
- 8 – classificação de madeira serrada
- 9 – estufas de secagem de madeira
- 10 – pátio de secagem ao ar;
- 11- remanufatura (plainas moldureiras)
- 12 – embalagem e expedição.

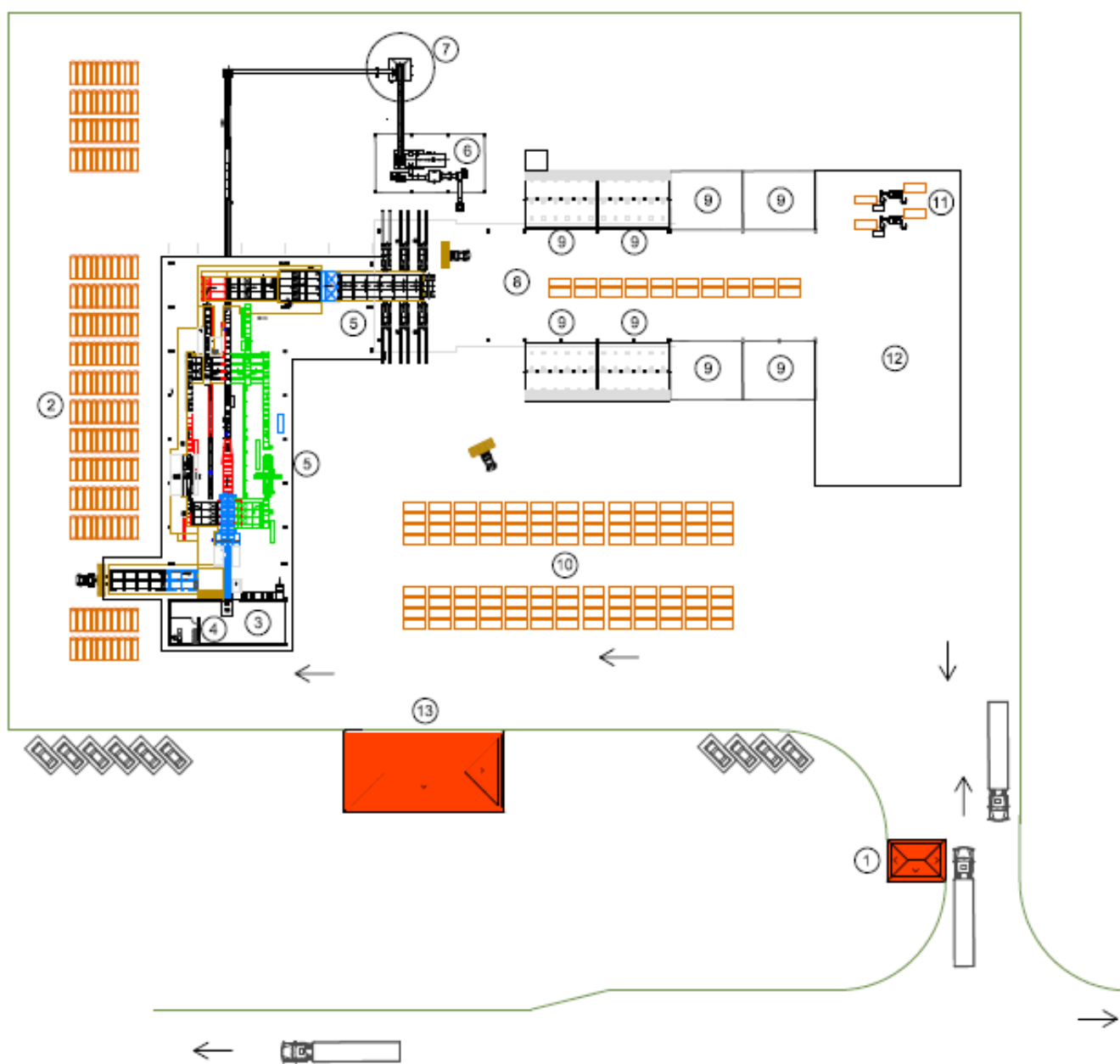


Figura 8- Arranjo Físico Conceitual
Fonte: Autoria própria (2016)

3.1.1 Caracterização da Indústria

Na Tabela 2 são demonstrados os principais dados da indústria proposta, onde constam as características principais, a produção, destino da produção, o faturamento, geração de resíduos e o custo com energia elétrica. Esses dados são considerados como parte das premissas adotadas

Tabela 2 – Dados principais

Características	Descrição
Indústria Madeireira	Madeira de pinus
Desdobro Primário	Serraria
Secagem	Estufas a vapor
Remanufatura	Molduras aplainadas
Classificação	Qualidade
Produção	35.000 m ³ /ano
Finalidade	Exportação
Geração Total de Resíduos	83.300 toneladas/ano
Faturamento mensal	R\$ 7 milhões (US\$ 2 milhões) (US\$ 3,30)
Faturamento anual	R\$ 84 milhões (US\$ 25,5 milhões) (US\$ 3,30)
Gasto com energia elétrica mensal	R\$ 88 mil (US\$ 26 mil) (US\$ 3,30)
Gasto com energia elétrica anual	R\$ 1 milhão (US\$ 320 mil) (US\$ 3,30)

Fonte: Autoria Própria (2016)

O faturamento estimado na Tabela 2 toma como base o valor de R\$ 1350,00/m³ (US\$ 400,00/m³) da moldura de madeira seca em estufas. Como a produção é de torno de 60.000 m³/ano e mais a receita de venda de cavaco limpo chega-se ao faturamento bruto apresentado acima.

3.1.2 Descrição do Processo

i. Recebimento da Matéria Prima

O recebimento da matéria prima é feito na portaria da indústria, onde o caminhão passa por uma pesagem, tanto na entrada como na saída, pois normalmente o controle de matéria prima é feito por peso.

ii. Pátio de Toras

Após o recebimento, é realizado o descascamento da matéria prima, a qual é empilhada no mesmo instante.

iii. Descascamento

As toras são descascadas e classificadas seguindo para a mesa de entrada da serraria e/ou para os boxes de segurança nos casos em que a serraria não comporta todo o material descascado. As cascas residuais normalmente são armazenadas para abastecimento da caldeira de estufa de secagem.

iv. Serraria

Esta etapa do processo é formada por um conjunto de máquinas que operam em sistema de linha contínua, desde a entrada das toras na mesa de alimentação da serraria até a classificação das peças já serradas. Ainda na serraria, as toras são desdobradas em pranchas em pranchas e/ou tábuas, em bitolas que variam de acordo com a necessidade da indústria, em seguida é feita uma classificação de bitolas e ainda dentro da serraria é realizado o gradeamento da madeira serrada. Os resíduos gerados na serraria passam por um picador, gerando cavacos em dimensões adequadas para o abastecimento da caldeira e/ou vender para outro segmento industrial.

v. Pátio de Madeira Verde

As grades de madeiras são armazenadas sobre paletes no pátio de madeira verde, localizado na entrada das câmaras de secagem, para seguir ao processo de secagem. A movimentação das grades e formação das pilhas é feita por uma empilhadeira.

vi. Pátio de Acondicionamento

Este local é um espaço reservado na saída das câmaras e dentro das instalações de usinagem. Nele a madeira é armazenada durante 24 horas após sua saída da câmara, para que ocorra um resfriamento e liberação das tensões de secagem (ROCHA, 2002).

3.1.3 Fluxo do Desdobro das Toras (Serraria)

As toras classificadas e descascadas são desdobradas em uma serra-fita geminada, onde são obtidos os blocos e as costaneiras. Os blocos com maior espessura são orientados para uma serra múltipla, onde são obtidas tábuas. Os blocos de menor espessura são levados a uma serra-fita dupla para a obtenção de tábuas (ainda com esmoado). As costaneiras são dirigidas à outra linha com uma serra-fita dupla para a obtenção de tábuas (com esmoado). As tábuas com esmoado são direcionadas as serras refiladeiras. As tábuas obtidas passam em seguida por uma linha de destopo, sendo direcionadas ao setor de classificação manual. Após a

classificação, as tábuas são gradeadas manualmente, sendo posteriormente levadas à secagem (ROCHA, 2002).

O fluxo mencionado segue demonstrado na Figura 9.



Figura 9 - Fluxograma do Desdobro Adotado para as Toras de Pinus
Fonte: Autoria própria (2016)

O fluxograma de desdobro está relacionado com as operações da serraria, ou seja, até a preparação da madeira para a secagem em estufas.

3.1.4 Balanço de Massa

Para o cálculo dos resíduos gerados foi elaborado o balanço de massa de forma a esclarecer a quantidade disponível de resíduos para queima no modelo considerado, conforme apresentado na Figura 10.

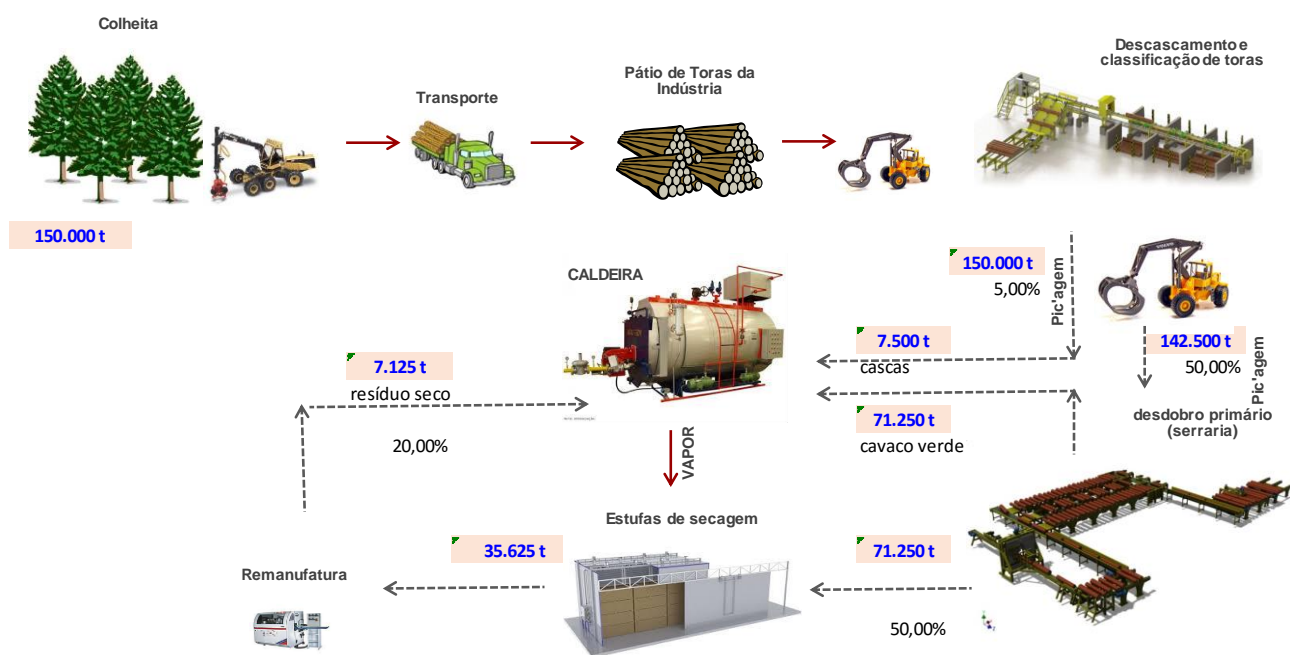


Figura 10- Balanço de Massa
Fonte: Autoria própria (2016)

O balanço de massa considera tudo que se perde ao longo do processo para obtenção do produto final, como para este trabalho justamente o que interessa são os resíduos (combustível para a cogeração) compostos por cascas, cavacos e serragem da serraria e os resíduos secos da remanufatura (plainas).

3.1.5 Disponibilidade Operacional

Conforme se observa na Tabela 3, as operações realizadas na unidade de desdobramento primário de toras (serraria), no setor de secagem de madeira serrada e na unidade de beneficiamento, vão ocorrer durante 252 dias/ano (21 dias/mês) em 02 turnos diários. Isso representa 369,6 horas trabalhadas ao mês ou aproximadamente 4.435 horas ao ano.

Tabela 3 – Disponibilidade Operacional por Setor

Item	Serraria, Secagem e Remanufatura	Energia Térmica (Caldeira)
Turnos	2 (8,8 h/turno)	4 turnos de 6 h/dia
Horas	369,6 h/mês (4435 h/ano)	24 h/dia / 720 h/mês (8.640 h/ano)
Dias	21 dias/mês 252 dias/ano	30 dias/mês 360 dias/ano

Fonte: Autoria Própria (2016)

Por outro lado o setor de geração de energia térmica (caldeira) foi dimensionado para operar 360 dias ao ano (30 dias/mês) em 4 turnos diários de 6 horas. Isso representa aproximadamente 720 horas ao mês (8.640 horas/ano). Os cinco dias restantes do ano serão disponibilizados para manutenções (caldeira) e paradas gerais, se necessário.

3.1.6 Necessidade de Vapor para Processo (Secagem de Madeira)

Considerando que a serraria produza madeira serrada para venda de produtos de maior valor agregado, ou seja, 100% do serrado deverá ser seco em estufas das 150.000 toneladas de toras, 75.000 toneladas são resíduos e os 75.000 toneladas restantes são serrados a serem secos.

Para o dimensionamento do setor de secagem considera-se que 50% da massa da madeira é de água a ser retirada e que se utiliza 2 kg de vapor para retirar 1kg de água da madeira (GALVÃO, A.P.M, 1985), portanto:

$$75.000 \times 0,5 \times 1000 \times 2 = 75.000.000 \text{ kgv/ano para secar toda a madeira.}$$

Levando em consideração que o setor de secagem opera 24 horas por dia, durante 360 dias no ano (5 dias para manutenção), o número de horas anuais é de 8640 horas, logo:

$$75.000.000 \text{ kgv/ano} \div 8640 \text{ h} \div 0,9 = 9.645,06 \text{ kgv/h}$$

Ou seja, é necessária uma caldeira de 10 t/h para suprir a demanda de vapor para a secagem da madeira. Sob o aspecto de processo seria suficiente, no entanto, queimaria apenas 1/3 do resíduo disponível na indústria, sendo que o restante deveria ser vendido e caso isso não ocorra, geraria um passivo ambiental para a indústria, como demonstrado no item 3.1.6.

3.1.7 Necessidade de combustível para processo

Para atender a demanda da caldeira de processo o cálculo da massa de resíduo segue a fórmula abaixo:

$$M_{cav} = \frac{M_{vp} (\Delta h)}{\eta \cdot pci}$$

Onde:

M_{cav} – massa de cavaco em kg/h

M_{vp} – Massa de vapor em kgv/h

Δh – Variação de entalpia do vapor saturado e da água

Entalpia vapor a 8 kgf/cm² (113,8 PSI) e temperatura de 170 °C = 661 kcal/kg

Entalpia da água a 1 kgf/cm² (14,2 PSI) e temperatura de 90 °C = 105 kcal/kg

η – rendimento

PC_i – poder calorífico inferior

(PC_i de 1750 kgcal/kg umidade de 55,41% BU e PC_S de 4670 kcal/kg)

$$M_{cav} = \frac{10000 (661 - 105)}{0,75 \times 1750} = 4.236,19 \text{ kg/h}$$

Como a indústria trabalha em dois turnos totalizando 17,6 horas/dia e durante 21 dias mensais e 12 meses no ano o consumo de combustível calculado será:

$$(17,6 \text{ h} \times 21 \text{ dias} \times 12 \text{ meses} \times 4.236,19 \text{ kg/h}) \div 1000 = 18.788,35 \text{ t/ano}$$

Aproximadamente 19.000 t/ano. Sendo assim, das 75.000 toneladas disponíveis de resíduo na operação industrial são utilizados na geração de vapor para processo (secagem de madeira) apenas 19.000 t, o restante, cerca de 56.000 t são descartados como um passivo ambiental caso não se encontre um destino econômico para este resíduo.

3.1.8 Consumo de Energia

O consumo de energia da indústria foi estimado a partir dos motores elétricos instalados na serraria, na caldeira, nas estufas de secagem, no setor de manufatura e demais áreas (escritórios, vestiários, refeitórios, portarias e áreas externas em geral). Na Tabela 4 são relacionados os motores para os principais equipamentos para desdobro das toras de pinus na serraria.

Tabela 4 – Carga instalada da Serraria

Equipamento	Quantidade	Potencia (CV)	Total (CV)
Serra fita dupla	2	75	150
Múltipla	2	50	100
Resserra	2	40	80
Refiladeiras	2	15	30
Destopadeira	2	7,5	15
Transportes	30	7,5	225
Outros	-	-	150
Total Geral	-	-	750

Fonte: Autoria Própria (2016)

O Motores instalados na caldeira totalizam 25 CV e nas quatro estufas com capacidade de 150 m³ de madeiras são 8 motores de 5 CV nos ventiladores , totalizando 40 CV por estufa e 160 CV no total. Na manufatura duas plainas com motores de 50 CV cada, perfazendo 100 CV. Para os demais setores foi considerado o equivalente instalado de 300 CV no total. Em resumo a Tabela 4 apresenta a instalação industrial em termos de consumo. Para o cálculo da demanda foi utilizada a fórmula abaixo (IFSC-2016):

$$D = \frac{P.736}{\eta.FP} . Fu. Fs$$

D – Demanda em Watts

P– Potencia Instalada

η – Rendimento (0,93) - Fabricante

Fp – Fator de Potência (0,88) – Fabricante

Fu – Fator de Utilização (0,87) – Tipo de Uso

Fs – Fator de Simultaneidade (0,65)

Sendo assim, calculando a demanda para a serraria temos:

$$D = \frac{750.736}{0,93.0,88} . 0,87.0,65 = 381.422,29 VA$$

Ou seja, 381,42 kVA ou 335 kW (0,88 – Fator de potência), para a serraria e demais setores conforme listado na Tabela 5, seguindo a mesma base de cálculo.

Tabela 5 – Consumo de Energia

Item / Setor	Potência Instalada (CV)	Horas operacionais anuais	Demanda (kW)	Consumo (kWh/ano)
Serraria	750	4435	336	1.488.615
Vapor (Caldeira)	25	8640	11	96.668
Secagem (Estufas)	160	8640	72	618.673
Remanufatura	100	8640	45	386.671
Outros (escritórios, vestiários, refeitórios, portarias e áreas externas)	300	2220	134	298.059
Total Geral	1335	-	597	2.888.685

Fonte: Autoria Própria (2016)

Em relação às horas operacionais segue o demonstrado na Tabela 3 apresentada anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são estabelecidas as premissas adotadas, alertando que mudanças em qualquer uma das variáveis tem um impacto significativo. Dessa forma qualquer mudança é objeto de revisão para validar novos valores a serem encontrados.

4.1 RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

4.1.1 Mix de combustível (Biomassa de madeira de Pinus)

Conforme demonstrado no balanço de massa a transformação tora/serrado impacta na geração de resíduos desde a preparação das toras para a entrada na serraria até o processo de obtenção do produto final (serrado aplainado seco).

Em resumo a Tabela 6 sintetiza a quantidade e a procedência de cada tipo de resíduo:

Tabela 6 – Tipo de Resíduo, Quantidade e Procedência

Tipo de Resíduo	Quantidade Gerada (t)	Observações
Cascas	15.000	• Proveniente do sistema de descascamento e classificação de toras no pátio
Cavaco Verde/ serragem	60.000	• Proveniente do desdobro de toras na serraria (serra fita, serras circulares e picador de costaneiras e destopos)
Pó de lixa e maravalha (seca)	8.300	• Proveniente do setor de aplainamento remanufatura (plainas moldureiras e destopadeiras)

Fonte: Autoria Própria (2016)

A somatória de resíduos é de 83.300 toneladas/ano.

4.1.2 Poder Calorífico dos Resíduos e Potenciais de Geração de Vapor

Para efeito de utilização dos resíduos gerados como biomassa para queima em caldeiras, utilizaram-se como variáveis qualitativas para os cálculos térmicos os valores obtidos na determinação do poder calorífico de cada combustível e a sua umidade básica.

4.1.3 Cálculo do poder calorífico efetivo do mix de resíduos (base seca)

- **Mix (Casca, Cavaco Verde e serragem e pó de lixa e maravalha seca)**

$$PC_i = 17,3 \text{ MJ/kg}$$

$$U = 44\% \text{ (Umididade)}$$

Para cada kg de biomassa existe 0,56 kg de massa seca e 0,44 kg de água.

$$PC_{\text{lef}} = Q2 - Q1 \text{ (poder calorífico efetivo)}$$

Q2 = energia contida na massa seca

Q1 = Energia necessária para aquecer a água e o vapor contido na biomassa.

Para cada kg de biomassa existem 0,56 kg de massa seca, então:

$$Q2 = PC_i \times 0,56 \text{ kg}$$

$$Q2 = 17,3 \text{ MJ} \times 0,56 \text{ kg} / 0,004184 \text{ (1 kcal = 0,004184 MJ)}$$

$$Q2 = 2315,49 \text{ kcal/kg de massa úmida}$$

Para cálculo de Q1 utilizou-se a fórmula:

$$Q1 = (Ma \times c_{pa} \times \Delta t_a) + (Ma \times (h_2 - h_1)) + (Ma \times (h_3 - h_2))$$

Onde:

$$Ma = \text{massa de água para 1 kg de biomassa} = 0,44 \text{ kg}$$

$$c_{pa} = \text{calor específico da água} = 1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_a = (100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 80^\circ\text{C} \text{ (aquecimento da água na fase líquida)}$$

$$h_1 = \text{entalpia da água a } 100^\circ\text{C} = 100,0 \text{ kcal/kg}$$

$$h_2 = \text{entalpia do vapor a } 100^\circ\text{C} = 639,0 \text{ kcal/kg}$$

$$h_3 = \text{entalpia do vapor a } 200^\circ\text{C} = 687,2 \text{ kcal/kg (na temperatura de saída dos gases)}$$

$$Q1 = 0,44 ((1 \times 80) + (639-100) + (687,2 - 639,0))$$

$$Q1 = 293,56 \text{ kcal/kg}$$

Então:

$$PC_{\text{lef}} = 2315,49 - 293,57$$

$$PC_{\text{lef}} = 2021,92 \text{ kcal/kg} = 8,45 \text{ MJ/kg de massa úmida}$$

4.1.4 Quantidade de Vapor Gerado com o Resíduo Disponível

Nas condições do vapor adotadas como alternativa (2,1 MPa e 673 K), calculou-se a quantidade de vapor obtenível através da seguinte fórmula:

$$V = \frac{M \cdot \eta \cdot PCI_{ef}}{\Delta h}$$

Onde:

V = quantidade de vapor (kg/h) obtenível

M = massa de combustível necessária (kg/h)

Δh = diferença das entalpias entre o vapor na saída da caldeira (kcal/kg) e água de alimentação.

PCI_{ef} = Poder calorífico efetivo do combustível (kcal/kg)

η = rendimento da caldeira

Os valores de entalpia foram obtidos através do diagrama de Mollier (Van Wylen, 1998).

O resíduo disponível é de 83.300 t/ano e se considerar 360 dias no ano, tem-se 231.388 kg/dia de resíduo, logo:

$$V = \frac{231388 \cdot 0,8 \cdot 2021,92}{(768 - 105)} = 564524,67 \text{ kgv/dia}$$

Calculando-se a quantidade de vapor obtenível com a queima de todos resíduos, levando em consideração uma taxa de eficiência de 90% obtém-se:

$$V = ((564.524,67 \text{ kgv/h} / 24 \text{ h/dia}) \times 0,9) = 21.169,67 \text{ kgv/h}$$

A produção de vapor de 21.169,67 kgv/dia, a 2,1 MPa e 673K, totaliza a quantidade obtenível a partir da queima de todos resíduos, nas condições de umidade em que foram obtidos seus respectivos valores de poder calorífico.

4.1.5 Quantidade de cavacos necessários para a matriz de combustíveis.

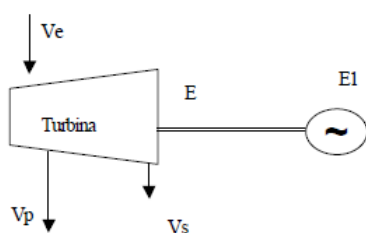


Figura 11 - Entrada e Saídas de Vapor na Turbina
Fonte: Pereira Junior (2001)

Conforme a Figura 11 as condições pré-estabelecidas para o sistema proposto são:

V_e = Vapor de entrada = 2,1 MPa e 673 K

V_s = Vapor de saída = 0,25 MPa

V_p = Vapor para o processo = 10 t/h, 0,8 MPa saturado

μ_t = Eficiência da turbina = 75%

μ_m = Perdas mecânicas na turbina = 0,4%

μ_r = Perdas no redutor = 2%

μ_g = Perda no gerador = 4%

E = Energia transferida para o eixo da turbina

E_1 = Energia nos bornes do gerador

M_{ve} = Massa de vapor na entrada da turbina (a determinar)

M_{vs} = Massa de vapor na saída da turbina (a determinar)

M_{vp} = Massa de vapor de extração para o processo = 10 t/h

• **Cálculo do consumo de vapor na turbina**

h_e = Entalpia de entrada = 775,6 kcal/kg

h_s = Entalpia teórica de saída = 641 kcal/kg (variação isentrópica)

h_p = Entalpia do vapor na extração = 661 kcal/kg

Fazendo-se o balanço de energia na turbina obtém-se:

$$E = (M_{ve} \times h_e) - (M_{vs} \times h_s) - (M_{vp} \times h_p)$$

$$E = (M_{ve} \times h) - (M_{ve} - M_{vp} \times h_s) - (M_{vp} \times h_p) \text{ "equação (a)"}$$

$$E_1 = 2,5 \text{ MWh (nos bornes do gerador)}$$

$$1 \text{ kWh/h} = 860 \text{ kcal/h}$$

$$E_1 = 2.150.000 \text{ kcal/h (2,5x860x1000)}$$

Considerando as perdas mecânicas na turbina, o rendimento do redutor, as perdas no gerador e o rendimento da turbina obtém-se:

$$E = E_1$$

$$(1 - \mu_m) \times (1 - \mu_r) \times (1 - \mu_g) \mu_t$$

$$E = 3.059.289,31 \text{ Kcal/h}$$

$$0,996 \times 0,98 \times 0,96 \times 0,75$$

$$E_1 = 4.353.140,04 \text{ kcal/h}$$

Substituindo-se em (a) obtém-se:

$$4.353.140,04 = (M_{ve} \times 775,6) - (M_{ve} - 12) \times 641 - (25 \times 661)$$

$$M_{ve} = 22.730,53 \text{ kgv/h}$$

Então, a quantidade necessária de vapor para produção de **2,5 MWh** de potência elétrica nos bornes do gerador e produção de 25 tv/h a 2,1 MPa, superaquecido, para o processo é de 22.730,53 kgv/h (a 2,1 MPa e 673 K).

$$M_{cav} = \frac{22730,53 (775,6 - 105)}{0,8.2021,9} = 9423,74 \text{ kg/h}$$

Ou seja, considerando 8640 horas ano são necessários aproximadamente 82.000 toneladas de resíduo para a cogeração de energia, próximo da disponibilidade oferecida de 83.300 t calculada anteriormente.

4.2 ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

O objetivo da análise econômica e financeira é avaliar se um determinado usuário de energia apresenta condições técnicas e econômicas para adotar a cogeração como seu sistema de produção de utilidades. Em outras palavras, qualquer que seja a motivação que o empresário tenha ao buscar a cogeração, a análise verificará se a redução que se pode obter nos custos de aquisição da energia é suficiente para garantir um retorno adequado para o investimento a ser realizado.

A principal vantagem econômica da cogeração está na possibilidade de uma empresa com grande demanda de energia térmica e elétrica, consumindo combustíveis, atender à sua demanda de energia elétrica com um sistema que lhe dê autossuficiência. Outra forma de ver a vantagem está em conseguir um custo de autoprodução de energia elétrica menor do que o obtido através da compra à concessionária mediante a redução do custo com combustível para atender sua demanda de energia térmica.

A implantação da alternativa proposta de utilização dos resíduos e de complementação da matriz com cavacos de madeira para produção de vapor e utilização de calor, com a geração de energia elétrica representa um investimento de R\$ 12.800.000,00 (US\$ 3.878.787,87) (US\$ 3,30 por real – julho de 2016).

4.2.1 Premissas Adotadas na Análise Econômica Financeira

Nas premissas fica estabelecido conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Premissas Adotadas

Parâmetros	Adotado
Preço do MWh para compra da Concessionária	R\$ 350,00 (US\$ 106,00)
Preço do MWh para venda no mercado livre	R\$ 200,00 (US\$ 60,60)
Custo da Madeira (Resíduo)	R\$ 45,00/t (US\$ 13,60/t)
Custo de manutenção (relação ao investimento)	1,5% ao ano
Sobressalentes (com relação ao investimento)	1,0% ao ano
Juros	12% ao ano
Depreciação	30 anos

Fonte: Copel, ANEEL, Outros. (2016)

4.2.2 Investimentos Necessários

Os investimentos previstos para a unidade de industrial, relacionados à fabricação de manufaturados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estimativa de Investimento na Cogeração de Energia

Setor	Valor (1.000 R\$) (1.000 US\$)
Gerador de vapor de 25 tv/h a 2,1 Mpa, 673 K	6000 (1818)
Turbina a vapor/redutor Admissão: 2,1 MPa, 673 K, 25 tv/h Extração: 0,8 MPa, 10 tv/h Escape: 0,25 Mpa	2140 (648)
Gerador síncrono trifásico, 2500 kVA, 13,8 kV, 60 Hz, 04 pólos – painéis elétricos	2570 (778)
Obra civil e montagem eletromecânica/materiais (bombas, tubulações, acessórios)	2090 (633)
Total	12.800 (3879)

Fonte: ⁶ Base Sólida Energia (2012) – US\$ 3,30 – Julho de 2016.

4.2.3 Custos Envolvidos

Nos custos considera-se a depreciação, o custo dos cavacos de madeira, juros, peças de reposição e manutenção conforme demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Estimativa de Custos Anuais

Setor	Valor (1.000 R\$) (1.000 US\$)
Cavaco Limpo (R\$ 32,00/t) Agosto 2016 – 46000 t	1472 (446)
Mão de Obra com encargos	500 (152)
Combustíveis Carregadeiras	80 (24)
Custo de manutenção (relação ao investimento)	192 (58)
Sobressalentes (com relação ao investimento)	128 (39)
Depreciação	427 (129)
Total	2.799 (848)

Fontes: Sindicatos (2016) – US\$ 3,30 – Julho de 2016.

4.2.4 Receitas Anuais

Na Tabela 10 são demonstradas as receitas onde consideram-se a venda da energia excedente e o custo evitado com a compra de energia na concessionária local.

Tabela 10 – Estimativa de Receitas Anuais

Setor	Valor (1.000 R\$) (1.000 US\$)
Venda do Excedente de Energia Elétrica ((2.500 x 8.640) – (208.000 x 12)) = 18.600.000 kWh– R\$ 200,00 (leilão)	3.821 (1158)
Energia Elétrica (Evitado)	1.399 (424)
Total	5.220 (1582)

Fonte: Copel (2016) – US\$ 3,30 – Julho de 2016.

4.2.5 Fluxo de Caixa

No fluxo de caixa ao longo de 10 anos da planta de cogeração com vida útil acima de 30 anos pode apresentar períodos de tempo em que a planta dê lucro e em outros prejuízos em função das variações de parâmetros econômicos que contêm incertezas, tais como tarifas, taxa de câmbio, tributos, preço dos combustíveis, custos de operação entre outros. Na Tabela 11 está representado o fluxo de caixa para 10 anos considerando as receitas, despesas e o fluxo líquido.

Tabela 11 – Fluxo de Caixa

Ano	Receita		Despesas		Fluxo Líquido	
	(1.000 R\$)	(1.000 US\$)	(1.000 R\$)	(1.000 US\$)	(1.000 R\$)	(1.000 US\$)
1	-		12800	(3879)	-12800	(-3879)
2	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
3	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
4	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
5	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
6	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
7	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
8	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
9	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)
10	5.220	(1582)	2.799	(848)	2.421	(734)

Fonte: Autor (2016)

Na Figura 12 é demonstrado de forma clássica o fluxo de caixa apresentado na Tabela 11.

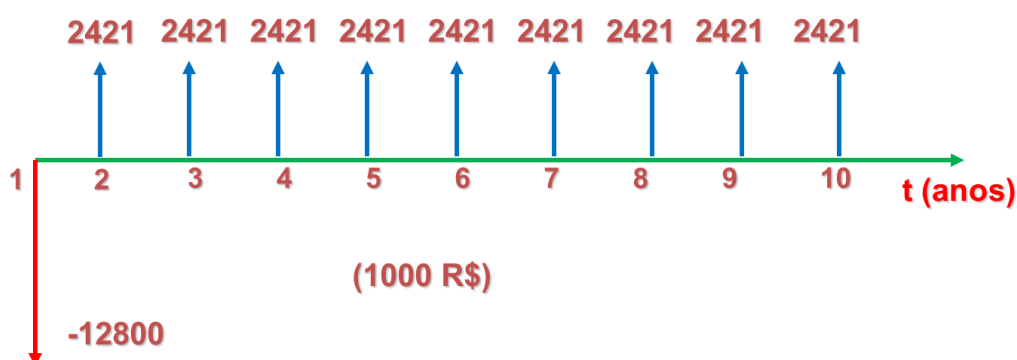


Figura 12 – Fluxo de Caixa

Fonte: Autor (2016)

Ressalta-se que os resultados apresentados seguem as premissas adotadas anteriormente e alteram-se quando são utilizados outros parâmetros de entrada.

4.2.6 Cálculo do VP. (Valor Presente)

$$V_p = \sum_{i=0}^n (B_i - C_i) / (1 + j)^i$$

$$i = 0$$

onde $(B_i - C_i) =$ Fluxo líquido

$j =$ taxa de juros (12% a.a.) (O BNDES possui linhas de crédito direta para as empresas na faixa de 9,5 a 13,86% para projeto de até R\$ 20 milhões ou US\$ 6 milhões a taxa de US\$ 3,30 por real)

(B = receita)

(D = despesa)

(n = tempo)

$$VP = -12800 + \frac{2421}{1,12^1} + \frac{2421}{1,12^2} + \frac{2421}{1,12^3} + \frac{2421}{1,12^4} + \frac{2421}{1,12^5} + \frac{2421}{1,12^6} + \frac{2421}{1,12^7} + \frac{2421}{1,12^8} + \frac{2421}{1,12^9}$$

$VP = R\$ 879.190,00$

$(US\$ 266.421)$

4.2.7 Cálculo da T.I.R. (taxa interna de retorno)

$$VP = -12800 + \frac{2421}{(1+r)^1} + \frac{2421}{(1+r)^2} + \frac{2421}{(1+r)^3} + \frac{2421}{(1+r)^4} + \frac{2421}{(1+r)^5} + \frac{2421}{(1+r)^6} + \frac{2421}{(1+r)^7} + \frac{2421}{(1+r)^8} + \frac{2421}{(1+r)^9}$$

Fazendo-se o valor presente (Vp) igual a “zero”, obtém-se:

T.I.R. (r) = 0,137 (13,7,0 %)

Tanto o valor presente (positivo), quanto a taxa interna de retorno (que também é positiva), demonstram que os investimentos para implementação da alternativa de cogeração utilizando turbina a vapor, são atraentes nas condições e parâmetros utilizados.

4.2.8 Cálculo do Payback Nominal e Descontado

- ✓ Para o Payback Nominal: 5 anos, 3 meses e três dias.
- ✓ No Payback Descontado: 8 anos, 11 meses e dezenove dias.

4.2.9 Consideração sobre a análise econômica

Com os parâmetros e premissas estabelecidos o modelo analisado é viável, porém, com as variações dos dados deixam de ser determinísticos e passam a possuir variáveis probabilísticas, refletindo as diversas incertezas envolvidas no projeto de cogeração, apesar de poderem ser aplicados mecanismos de mitigação (*hedges*) de riscos associados a preços de combustíveis e de energia elétrica.

Na Figura 13 se demonstra a sensibilidade do empreendimento analisado com relação ao valor de compra da energia da concessionária e o valor de venda no mercado livre de energia, através dos leilões.

Na primeira coluna os valores utilizados para elaboração deste trabalho e nas seguintes as variações de preço em torno de 15% para cima ou para baixo.

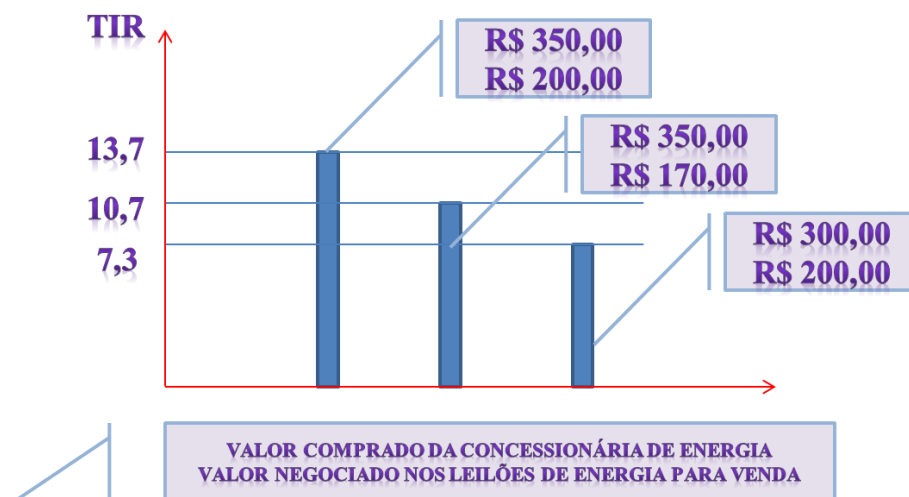


Figura 13 – Análise de Sensibilidade em Relação ao Valor da Energia Elétrica
 Fonte: Autor (2016)

Como se pode observar na alteração dos valores, ocorre uma variação bastante significativa na taxa interna de retorno do investimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Para atender o objetivo geral proposto no trabalho em que se refere a estudar a viabilidade do aproveitamento da biomassa como fonte de energia renovável em uma indústria, os objetivos específicos propostos foram atendidos parcialmente uma vez que o trabalho foi sendo conduzido mais voltado ao foco principal. Sendo assim, alguns desses objetivos específicos não foram exauridos a fundo, por realmente não haver necessidade para se atingir o objetivo final.

Dentro do que foi proposto foram utilizados os princípios termodinâmicos e os dados relacionados a poder calorífico da biomassa para dimensionar o empreendimento de cogeração de energia com utilização de vapor para processo.

As tecnologias foram mencionadas tanto de cogeração como de preparo da biomassa utilizando processos de redução da umidade.

A umidade da biomassa é fator fundamental quando da análise de seu aproveitamento, pois se utiliza grande parte do poder calorífico do combustível para evaporar a parcela de água presente no mesmo. Esta variável é de extrema importância quando da análise e simulação de um sistema de cogeração utilizando biomassa como combustível.

Sob o aspecto econômico, segundo a Análise do Valor Presente (em 10 anos) e da verificação da Taxa Interna de Retorno (T.I.R.), o investimento para cogeração de energia utilizando os resíduos industriais demonstrou-se vantajoso. O preço da energia elétrica praticado no mercado, verificado nos preços praticados pela concessionária é o principal fator que viabiliza tais investimentos. Trata-se de um investimento de risco, pois em 10 anos, outros custos podem ser afetados, tais como o custo da madeira, as taxas de juros e principalmente o mercado de energia.

Conclui-se então que os custos de energia elétrica praticados atualmente são atrativos e permitem a viabilização de investimentos e de retorno dos mesmos com as alternativas ou sistemas de cogeração simulados para a fábrica em questão, pois apresentou um retorno de aproximadamente nove anos considerando os custos atuais. Estes investimentos são vantajosos em condições de aumentos consideráveis dos custos de energia elétrica ou em situações em que sua falta

passa a ser uma realidade irreversível, impedindo assim a continuidade do processo de produção fabril.

De maneira geral, e como regra prática, produzir energia elétrica com base em madeira de plantios florestais dedicados garante retornos de investimentos em torno de 10%, exige um preço de venda de energia superior a 140 reais por MWh (megawatt-hora), e um custo da madeira na usina de no máximo 50 reais por tonelada. (Revista Referência, 125 coluna Ivan Tomaselli).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a aprofundar e/ou continuar a pesquisa realizada neste trabalho, são sugestões de trabalhos futuros:

- Analisar outros horizontes para empresas de diversos portes.
- Analisar a influência da umidade no PC_1 do combustível em testes.
- Estudar a possibilidade de aproveitar a saída de gases da caldeira para a secagem da biomassa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília** : ANEEL, 2008. 153 p. : il. 1. Energia elétrica – Atlas - Brasil. 2. Potencial energético – Atlas - Brasil. 3. Setor elétrico – Atlas - 5. Biomassa – Atlas – Brasil. I. Título.

Agroenergia da biomassa residual : perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais - 2. ed. rev. 2009

Apostila de Co-geração – **Curso de engenharia de equipamentos** - Professor Newton Paterman Brasil (2005)

Apostila de Eficiência Energética em Sistemas de Vapor (2005)

Aumento da eficiência na conversão de madeira tropical e utilização de resíduos de fontes sustentáveis. 2005

BAZO, Edson. **Geração de Vapor.** 2ª edição – Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras** – 3ª edição – Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

CARIOCA e ARORA, José Osvaldo Bezerra D. SC. e Harbans Lal Ph D. Biomassa – **Fundamentos e Aplicações Tecnológicas** - Departamento de Química Analítica e Físico-Química e Núcleo de Fontes não Convencionais de Energia da Universidade Federal do Ceará, 1984.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA -Eficiência Energética no Uso de Vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CORRÊA NETO, Vicente - **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Canade-açúcar e Gás Natural** [Rio de Janeiro] 2001 XIV, 194 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ)

DURAN Y TUSET, Fernando y Rinaldo – Ingenieros Agrónomos. **Manual de Maderas Comerciales, Equipos y Procesos de Utilizacion.** Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur S.R.L, Montevideo – Uruguay.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem Racional da Madeira.** São Paulo: Livaria Nobel S.A., 1985. 111p. ISBN 85-213-0279-7.

JÚNIOR, Pereira; BAPTISTA, Vantuir. Alternativas para a cogeração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira. 2001.

MENDES, Alfredo de Souza. **A Secagem da Madeira.** Manaus: INPA (Instituto Nacional de Pesquisas), 1996.

Revista Referencia, **Ivan Tomaselli** – Artigo 125 – Outubro/2016

ROCHA, M. P. **Técnicas e Planejamento em Serrarias**. Ed. Revisada. Curitiba: FUPEF, 2002.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno (organizador). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.

VAN WYLEN, SONNTAG E BORGNAKKE, Gordon J., Richard E. e Claus. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 5ª ed. Americana Editora Edgard Blücher Ltda., 1998.

¹ _____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANAEEEL. Banco de Informações de Geração. Brasília: ANAEEEL. Disponível em: <<http://www.anaeel.gov.br>>. Acesso em: 28 março 2016.

² _____. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Balanço Energético do Brasil. Brasília: MME. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em: 28 março 2016.

³ _____. CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. Atlas da Bioenergia no Brasil. São Paulo: CENBIO, 2012. Disponível em: <<http://www.cenbio.iee.usp.br/download/atlasbiomassa2012.pdf>>. Acesso em: 28 março 2016.

⁴ _____. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - INEE. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp>. Acesso em: 03 junho 2016.

⁵ _____. INSTALAÇÕES ELÉTRICA INDUSTRIAIS SLIDES PARTE II PDF. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~luis.nodari/eletrotecnica/>>. Acesso em: 23 setembro 2016.

⁶ _____. Disponível em: < www.basesolidaenergia.com.br >. Acesso em: 23 outubro 2016.

⁷ _____. Disponível em: < www.benecke.com.br >. Acesso em: 10 novembro 2016.

GLOSSÁRIO

Água livre - Água contida nos espaços vazios entre as células, nos vasos e poros da madeira, circulando livremente e de fácil remoção.

Aplainamento - Operação manual ou mecânica que se destina a igualizar as superfícies de uma peça de madeira.

Caldeira - Recipiente cuja função é, entre muitas, a produção de vapor através do aquecimento da água

Casca - Capa que cobre o lenho da árvore, apresentando geralmente duas partes distintas, uma interna e outra externa.

Casca externa - Parte mais externa da casca, composta de tecido morto e seco, que serve como proteção contra agentes externos.

Casca interna - Parte da casca situada entre o câmbio e a casca externa. É úmida e mole, com a função de transportar a seiva elaborada.

Costaneira - Tábua resultante do primeiro ou do último corte da tora, tendo uma face convexa e uma plana.

Condensador – São equipamentos de troca de calor onde ocorre a mudança de fase vapor para líquido.

Desaerador - Um desaerador é um dispositivo mecânico que elimina gases dissolvidos, tais como o dióxido de carbono e oxigênio, a partir da água de alimentação antes de chegar à uma caldeira de tubulação. A desaeração é feita para prevenir a corrosão, ajudando a reduzir a manutenção da planta e os custos operacionais.

Destopadeira - Máquina que corta transversalmente uma peça de madeira, através de um disco de serra.

Esmoadado - Denominação dada pela falta de madeira, originada por qualquer motivo, na quina das peças.

Estufa - Câmara ou túnel utilizado para secar e condicionar madeira e produtos derivados, onde se pode controlar de maneira independente a umidade relativa e a temperatura do ar. Geralmente provida de ventilação interna.

Higroscopicidade - Propriedade de uma substância, como a madeira, que lhe permite absorver ou perder umidade facilmente.

Lixadeira - Máquina utilizada para lixar a madeira por intermédio de uma cinta abrasiva, folha, disco ou banda larga.

Madeira seca em estufa - Madeira submetida a um processo artificial de secagem em estufa.

Madeira serrada - Madeira resultante do desdobro de toras por meio de cortes longitudinais com o emprego de serra ou outro equipamento equivalente.

Madeira verde - Madeira com alto teor de umidade, contendo água livre nas cavidades celulares.

Plaina - Instrumento utilizado na marcenaria, cuja finalidade é alisar a madeira.

Plaina desengrossadeira - Máquina em ferro fundido, constituída de um eixo com navalhas cortantes e dois rolos de alimentação, que funcionam automaticamente. Dispõe de dois rolos lisos, ao nível da mesa, que servem para o deslize do material. Possui, na parte superior, uma capa de proteção para cobrir o eixo. Serve para desbastar e uniformizar espessuras.

Plaina moldureira - Com uma ferramenta superior, uma inferior e duas ferramentas laterais verticais, possibilitando a usinagem simultânea das quatro faces de uma peça de madeira.

Ponto de saturação das fibras - Estado da madeira em que não se verifica presença de água nas cavidades das células, estando, porém, as paredes celulares completamente saturadas com água.

Quina viva - Quina em que a intersecção forma aresta saliente.

Ressera – Equipamento de corte com serra fita para processar as costaneiras.

Secagem - Processo de redução do teor de umidade da madeira.

Secagem a vapor - Secagem da madeira por aquecimento a vapor de água.

Secagem em estufa - Processo de secagem da madeira efetuado no interior de uma câmara, onde se pode controlar a velocidade, a temperatura e a umidade relativa do ar.

Serra - Instrumento cortante, que tem como peça principal uma lâmina ou um disco dentado de aço.

Serra circular - Máquina que possui uma serra presa por flanges em um eixo. A serra apresenta a forma de um disco dentado, de espessura fina e animado por movimento circular.

Serra circular múltipla - Serra circular composta de muitas lâminas de serras circulares, montadas a distância, fixas sobre um mesmo eixo.

Serra de fita - Serra mecânica constituída por uma cinta de aço flexível dentada sobre uma ou duas bordas, em torno contínuo de dois ou três volantes, utilizada para cortar curvas, executar cortes angulares ou serrar madeira com casca, executando cortes longitudinais.

Serragem - Pó de finas partículas que sai da madeira ao ser cortada (serrada).

Teor de umidade - Quantidade de água contida na madeira, expressa como uma porcentagem da massa de madeira seca.

Tora - Porção do fuste comercial de uma árvore, destinada ao processamento industrial.

Trocador de calor - Um trocador de calor ou permutador de calor é um dispositivo para transferência de calor eficiente de um meio para outro. Tem a finalidade de transferir calor de um fluido para o outro, encontrando-se estes a temperaturas diferentes.

Turbina – Equipamento construído para captar e converter energia mecânica e térmica contida em um fluido em trabalho de eixo

Umidade da madeira - Quantidade de água existente em determinada amostra de madeira, usualmente expressa em percentuais como massa de água em relação à massa anidra da madeira.

Umidade de equilíbrio - Teor de umidade da madeira que estabelece um equilíbrio dinâmico com determinado ambiente. Depende, principalmente, da umidade relativa e da temperatura do ar.