

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

MARIANA FARIA PIRES GAMA ROCHA

Geração elétrica combinada biomassa – gás natural eficiente.

São Paulo

2012

MARIANA FARIA PIRES GAMA ROCHA

Geração elétrica combinada biomassa – gás natural eficiente.

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Especialista
em Energias Renováveis, Geração
Distribuída e Eficiência Energética –
PECE.

Área de Concentração: Geração de
Energia, Biomassa e Eficiência Energética

Supervisor: Professor Dr. José Roberto
Simões Moreira

São Paulo

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Rocha, Mariana Faria Pires Gama

**Geração elétrica combinada biomassa – gás natural eficiente / M.F.P.G. Rocha. – São Paulo, 2013.
110 p.**

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Geração de energia elétrica 2. Biomassa 3. Gás natural 4. Termoeletricidade 5. Energia (Eficiência) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

À minha mãe e à memória do meu pai, pelo amor, carinho, estímulo, compreensão e paciência, por me darem tudo que julgarem ser o melhor, por serem os meus modelos de dedicação ao trabalho e de luta por um ideal.

À minha irmã Carolina pelo amor, carinho, pelos comentários pertinentes e estimulantes, pela compreensão e paciência.

À minha avó Emília, pelo amor, carinho e exemplo de dignidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. José Roberto Simões Moreira, pela supervisão, por estar sempre solícito, pelas sugestões sempre oportunas e pelos ensinamentos recebidos durante todo o curso.

Aos colegas engenheiros Thiago de Moraes, Francisco Del Corso, Marino Michel Nadour, Manuel Lopes Gameiro e Hugo Leonardo Ferreira Verssuti, por quem tenho profunda admiração e respeito, pela colaboração na coleta de dados, pela estimulante troca intelectual na convivência diária e pela paciência.

À todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

Aos meus verdadeiros amigos pela companhia e amizade.

RESUMO

O presente trabalho visa estudar o processo de combustão direta utilizado em centrais termelétricas e que é responsável por maior parte da energia gerada no mundo. Desejou-se estudar o potencial de dois combustíveis, um de origem fóssil (gás natural) e uma biomassa (cavaco de madeira), e determinar proporção eficiente para queima direta destes em caldeiras. Pretendeu-se dimensionar equipamentos e balanços do ciclo térmico a vapor para uma central termelétrica de 20MW, capacidade média de plantas semelhantes em operação. Utilizou-se toda a produção de vapor para geração de energia elétrica. Visou-se alcançar configuração de planta eficiente provando-se por análise de viabilidade técnico-econômica. Estabeleceram-se premissas para dimensionar a central como: disponibilidade de combustíveis, caldeira dual fuel, planta localizada junto a rio, represa ou poço, suficiente volume de água grátis. Posicionou-se os equipamentos na central termoelétrica a ser estudada, considerou-se esquema típico de planta a vapor: caldeira, turbina, condensador com torre de resfriamento e desaerador. Com valores de pressão e entalpia obtidos de folhas de dados de equipamentos ou calculados de tabelas de propriedades termodinâmicas da água, executou-se o balanço de energias, para obter entalpias e estados da água no ciclo, e o balanço de massas para determinar a massa de queima dos combustíveis. Para os balanços foi projetado modelo deste ciclo térmico utilizando o software Microsoft Excel. Determinou-se os custos com equipamentos e operacionais (manutenção, combustíveis e água desmineralizada), e receitas para a análise econômica. Notou-se que a viabilidade da planta ocorre apenas para proporção de queima acima de 95% (em massa) da biomassa com as premissas e valores adotados neste trabalho. Entretanto discutiu-se fatores que afetam a viabilidade, como por exemplo: disponibilidade de água, custos dos combustíveis e valor de venda da energia. Concluiu-se que uma central termelétrica gás natural e biomassa é eficiente e viável quando diversos aspectos técnicos e econômicos estão combinados.

Palavras-chave: Geração de energia. Biomassa. Central termelétrica. Ciclo de Rankine. Eficiência energética.

ABSTRACT

This work aims to study the direct combustion process used in thermoelectric power plants and responsible for most of the generated energy in the world. The study of the potential of two fuels, one of them a fossil fuel (natural gas) and the other a biomass (wood chips), has been an object of desire in this work as the determination of the efficient proportion for direct burning in a boiler. The main aim is to size equipment and balances for the steam thermal cycle of a 20MW thermoelectric power plant, which is an average capacity of similar plants in operation. All steam produced is used for generation of electricity. This work aims to find an efficient plant configuration proving it by a technical economic analysis. Some assumptions are settled for sizing the plant as: enough fuel availability, dual fuel boiler, plant located next to a river or dam or enough volume of free water. The equipment is placed in the thermoelectric plant that is object of study, it is considered a typical scheme of a steam plant: boiler, turbine, condenser and cooling tower and deaerator. With values of pressure and enthalpy, obtained from datasheets of equipment or estimated from water thermodynamic properties tables, it is calculated the energy balance, to obtain all enthalpies and states of water in the cycle, and the mass balance to establish the mass of fuels in the combustion. For the balance calculus is designed a model of the thermal cycle using Microsoft Excel software. The costs of equipment, operational costs (maintenance, fuel and demineralized water) and incomes are defined and used for the economic analysis. It has been observed in the results that the viability of the plant occurs only when the burn ratio is greater than 95% (by mass) of biomass, considering the assumptions and values adopted in this study. However, in the discussion, factors that affect the viability of a thermoelectric power plant have been approached and examined, such as: water availability, fuel costs and energy sale value. It has been concluded that a biomass and natural gas thermoelectric power plant is efficient and viable when several technical and economic aspects are combined.

Keywords: Power generation. Biomass. Thermoelectric power plant. Rankine cycle. Energy efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1: CAVACO DE MADEIRA. FONTE:	
HTTP://WWW.COOPERMITI.COM.BR/EDUCACAO/CAVACO.PDF	18
FIGURA 2.2: PLANTA DE COMBUSTÃO. FONTE: SCHIMTZ E KOCH, 1996 APUD MARTINS,	
2006.	21
FIGURA 2.3: BALANÇO TÉRMICO DE TURBINA A VAPOR. FONTE: SCHIMTZ E KOCH, 1996 APUD	
MARTINS, 2006.	21
FIGURA 2.4: FLUXO DE ENERGIA DE UMA CENTRAL TÉRMICA COM COGERAÇÃO	
(DISPONIBILIDADE DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA). FONTE: RINO, 2008....	30
FIGURA 2.5: CICLO RANKINE COM COGERAÇÃO. FONTE: MARTINS, 2006.....	33
FIGURA 2.6: ARRANJO PARA CICLO RANKINE. FONTE: PUC-RIO	34
FIGURA 2.7: DIAGRAMA T x S PARA O CICLO DE RANKINE ARRANJO CORRESPONDENTE A	
FIGURA 2.6 ACIMA. FONTE: PUC-RIO.	34
FIGURA 2.8: PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA CALDEIRA. FONTE: MARTINS, 2006.	37
FIGURA 2.9: CORTE DE UMA TURBINA A VAPOR DE CARÇA ÚNICA SÉRIE A5/A9 DA GE.	
FONTE: PUC-RIO	42
FIGURA 2.10: ESQUEMA DE UMA TURBINA A VAPOR DE GRANDE PORTE. FONTE: PUC-RIO	42
FIGURA 2.11: ESQUEMA DE CONDENSADOR. FONTE: PUC-RIO	43
FIGURA 2.12: ESQUEMA DE UM TROCADOR DE CALOR TIPO CASCO E TUBO. FONTE: PUC-RIO	
.....	44
FIGURA 2.13: ESQUEMA DE DESAERADOR. FONTE: PUC-RIO	45
FIGURA 2.14: ESQUEMA EM CORTE DE UMA BOMBA HORIZONTAL MULTISTÁGIOS. FONTE:	
PUC-RIO	46
FIGURA 2.15: VALOR CALORÍFICO LÍQUIDO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ÁGUA NO COMBUSTÍVEL.	
FONTE: ERNHART, 2011	50
FIGURA 3.1: CICLO A VAPOR (RANKINE) PARA QUEIMA DE CAVACO DE MADEIRA E GÁS	
NATURAL. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO.	54
FIGURA 5.1: UTE PIERP – APRESENTA QUEIMA DE CAVACO, PLANTA MUITO SEMELHANTE À	
DESENVOLVIDA PARA ESTE ESTUDO. FONTE:	
HTTP://WWW.LOGOENERGIA.COM.BR/ALEN/PT/PROJETOS/UTE-PIE-RP/UTE-	
PIE-RP-FLUXOGRAMA-TURBO-GERADOR-ZOOM.JPG.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE ESPÉCIES FLORESTAIS (EUCALIPTOS E PINHEIROS). FONTE: SELECIONADO DE QUIRINO ET AL, 2005.	25
TABELA 2.2: PODER CALORÍFICO SUPERIOR, PODER CALORÍFICO INFERIOR E TEOR DE UMIDADE DE RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS (EUCALIPTOS, PINHEIROS E OUTROS). FONTE: SELECIONADO DE QUIRINO ET AL, 2005.....	25
TABELA 2.3: PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE ALGUNS COMBUSTÍVEIS. FONTE: MARTINS, 1980 APUD CORTEZ, 2011.....	26
TABELA 3.1: PREÇOS PARA EQUIPAMENTOS E OBRA CIVIL. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO A PARTIR DE DADOS DE FABRICANTES.	61
TABELA 4.1: DADOS DA TURBINA A VAPOR POR CONDENSAÇÃO SELECIONADA PARA ESTUDO. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO A PARTIR DE CATÁLOGO DE FABRICANTE (SIEMENS).....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABELA 4.2: DADOS DO DESAERADOR. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO A PARTIR DE CATÁLOGO DE FABRICANTE (STEAMMASTER)..	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABELA 4.3: RESUMO DE ENTALPIAS E ESTADOS DA ÁGUA PARA CICLO DE VAPOR FIGURA 3.1. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO.....	67
TABELA 4.4: VALORES DE VAZÃO MÁSSICA DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO E RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A VAZÃO MÁSSICA DE VAPOR PRODUZIDO PELA CALDEIRA E ENERGIA PRODUZIDA PELA TURBINA. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO A PARTIR DE SIMULAÇÕES NO SISTEMA MONTADO NO SOFTWARE EXCEL (VER APÊNDICE A).	68
TABELA 4.5: SIMULAÇÃO DE DUAS SITUAÇÕES DE USO DE COMBUSTÍVEIS NA PLANTA PARA COLETA DOS DADOS DE ANÁLISE ECONÔMICA. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO A PARTIR DE SIMULAÇÕES NO SISTEMA MONTADO NO SOFTWARE EXCEL (VER APÊNDICE A).....	69
TABELA 5.1: SIMULAÇÃO DE DUAS SITUAÇÕES DE USO DE COMBUSTÍVEIS NA PLANTA PARA COLETA DOS DADOS DE ANÁLISE ECONÔMICA, FINANCIAMENTO 60%, TAXA DE JUROS 3,5%, TEMPO AMORTIZAÇÃO 15 ANOS. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO A PARTIR DE SIMULAÇÕES NO SISTEMA MONTADO NO SOFTWARE EXCEL (VER APÊNDICE C).	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARSESP	Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BOP	Balance of Plant – Equipamento suporte para operar planta
COMGÁS	Companhia de Gás de São Paulo
CRO	Ciclo de Rankine Orgânico
CSSL	Contribuição Social Sobre o Lucro
Db	Densidade Básica
EBITDA	Lucro Antes do Imposto de Renda
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
EXCEL	Software Microsoft Excel
GE	General Electric
GEEs	Gases de Efeito Estufa
GN	Gás Natural
LAIR	Lucro Antes do Imposto de Renda
MP	Material Particulado
NPSH	Net Positive Suction Head
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PD	Payback Descontado
PLT	Primeira Lei da Termodinâmica
PS	Payback Simples
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido
UTE	Usina Termoelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
h	Entalpia Específica (kcal/kg)
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
$\dot{m}$	Fluxo de Massa (kg/h)
N ₂ O	Óxido Nitroso
P	Pressão (kPa)
P_{turb}	Potência da turbina (kW)
Q	Taxa de Calor (kW)
s	Entropia Específica (kJ/kg °C)
SO ₂	Dióxido de Enxofre
T	Temperatura (°C)
W	Trabalho
Δ	Delta – Variação
η	Eficiência

Subscritos e Sobrescritos:

a	Sistema de Baixa Temperatura
b	Sistema de Alta Temperatura
c	Relacionado à Caldeira
e	Entrada
s	Saída
t	Relacionado à Turbina
<i>cavaco</i>	Relacionado ao cavaco de madeira combustível
<i>gás natural</i>	Relacionado ao gás natural
1 a 7	Relacionado aos pontos do ciclo térmico figura 3.1

SUMÁRIO

SUMÁRIO	11
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 Considerações Gerais	16
2.2 Biomassa	17
2.2.1 O cavaco de madeira e seu uso energético	18
2.3 Conversão Térmica	19
2.3.1 Combustão da Biomassa	20
2.4 Principais Características dos Combustíveis – a madeira.....	23
2.4.1 Poder Calorífico.....	23
2.4.2 Umidade	27
2.4.3 Composição Química	27
2.4.4 Massa Específica.....	28
2.5 Central Termelétrica.....	29
2.5.1 Termodinâmica.....	31
2.5.1.1 Ciclo de Rankine	32
2.5.2 Equipamentos e sistemas de uma central termelétrica.....	36
2.5.2.1 Pátio de Biomassa.....	36
2.5.2.2 Caldeira.....	37
2.5.2.3 Turbina a Vapor.....	40
2.5.2.4 Condensador a água	42
2.5.2.5 Bomba de Condensado	43
2.5.2.6 Pré-Aquecedores.....	44
2.5.2.7 Desaerador	45
2.5.2.8 Bomba de Alimentação da Caldeira.....	46
2.5.2.9 Outros.....	46
2.6 Meio Ambiente	47
2.7 Análise Financeira	48
2.8 Eficiência Energética.....	49

2.9	Alternativas ao Sistema de Condensação.....	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	Configuração do Ciclo a Vapor	54
3.1.1	Modelo para determinar as entalpias e estados do ciclo.....	55
3.1.2	Modelo para determinar as vazões mássicas e potencia do ciclo	57
3.2	Elaboração da Análise de Viabilidade Econômica.....	60
3.2.1	Métodos de Análise de Viabilidade (PS, VPL, PD e TIR).....	63
4	RESULTADOS	65
4.1	Análise Técnica – Memória de cálculo	65
4.1.1	Determinando as entalpias e estados do ciclo	65
4.1.2	Determinando vazões mássicas e potencia do ciclo	68
4.2	Análise Econômica	69
5	DISCUSSÃO	71
6	CONCLUSÕES	75
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
8	APÊNDICES	80

1 INTRODUÇÃO

A crescente importância da energia renovável em substituição aos combustíveis fósseis gera a necessidade de um maior número de estudos acerca do potencial das matérias primas e dos processos utilizados para o aproveitamento energético.

A biomassa é considerada uma das fontes de maior potencial para produção de energia renovável no mundo, tanto para os países com economias desenvolvidas quanto para os com economia em desenvolvimento. A biomassa pode ser definida, de forma a se distinguir dos combustíveis fósseis, como um recurso natural que é renovável em um curto período de tempo.

Existem diversos métodos de geração de energia a partir da biomassa, um dos mais tradicionais é o processo de conversão térmica conhecido como combustão direta. Os processos de combustão direta produzem aproximadamente 80% da energia no mundo, as principais utilizações dessa energia são em usinas termelétricas, indústrias, transportes e aquecimento.

A combustão direta ocorre em caldeiras também chamadas de fornalhas e é uma reação química exotérmica onde um combustível, que pode ser de origem fóssil ou renovável, e um comburente, que é o oxigênio puro ou o oxigênio presente no ar, reagem liberando calor e luz.

As caldeiras são dimensionadas de forma a garantir a queima completa e contínua do combustível e obter um melhor aproveitamento da energia térmica resultante da combustão. O transporte do combustível através da caldeira é desenvolvido especificamente para cada tipo de biomassa e combustível fóssil utilizado. Além disso o tamanho de cada partícula da biomassa utilizada deve ser considerado já que a superfície de reação tem efeito significativo sobre a velocidade do processo. Menores partículas de combustível terão maiores velocidades de combustão. O vapor produzido nas caldeiras deve ser consumido imediatamente e não pode ser estocado para consumo futuro.

Algumas vantagens da combustão de biomassa são o baixo custo, combustível renovável, permite reaproveitamento dos resíduos e é menos poluente que as energias resultantes do uso de combustíveis fósseis. Já a principal vantagem

da queima de combustíveis fósseis são os altos valores encontrados para os seus poderes caloríficos.

As centrais térmicas realizam a queima da biomassa ou combustível fóssil em caldeiras para a produção direta de calor. Esta técnica é extremamente difundida e utilizada no mundo e é a principal tecnologia para o uso da biomassa sólida em centrais térmicas. Em geral a eficiência do processo de combustão para a geração de energia elétrica é aproximadamente 30%.

É muito importante que o processo de geração garanta uma certa eficiência energética para que além de se tornar viável economicamente também contribua, cada vez mais, para uma melhor utilização dos recursos naturais e fósseis necessários ao processo. Melhores eficiências são encontradas nos processos de geração quando o máximo de energia elétrica é gerada a partir da utilização de menor energia proveniente dos combustíveis, sejam estes fósseis ou renováveis.

Os custos da geração de energia elétrica através da combustão de biomassa se tornam viáveis em situações onde a matéria prima a ser queimada é um resíduo de baixo custo e principalmente quando não há competição desta matéria prima com algum outro mercado como o alimentar e o cosmético. Além disso para a viabilidade dos projetos também é necessário que os outros custos operacionais e de manutenção da planta, como por exemplo o custo de águas, tenham baixos valores.

Algumas das principais limitações do processo de combustão direta são a poluição causada pelos gases emitidos e a destinação das cinzas resultantes do processo.

O uso eficiente das culturas energéticas naturais e renováveis pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

1.1 Objetivos

É crescente o interesse e o investimento mundial em projetos e pesquisas que envolvam o uso de combustíveis renováveis como fonte para a geração de energia elétrica. Os principais motivos que justificam este investimento são os problemas existentes no atual sistema energético mundial, como por exemplo a exaustão das reservas de combustíveis fósseis, a falta de segurança de

abastecimento e os impactos ambientais. As energias renováveis se apresentam, no atual contexto, como fonte de diversificação dos modelos de plantas para geração de eletricidade. Diversas vantagens estão associadas a estes modelos, como por exemplo a redução de impactos ambientais, produção local de bens e insumos, garantia de suprimento de energia sustentável e aumento da diversidade de mercados produtores, garantindo a independência de importação de combustíveis fósseis. No Brasil uma das fontes renováveis de grande disponibilidade é a biomassa, principalmente da cana de açúcar e da madeira.

Um dos métodos para obter energia elétrica a partir da biomassa de forma a garantir uma maior escala de produção é através da combustão realizada em centrais termoeletricas. Outras tecnologias como gaseificação e pirólise ainda não apresentam plantas comerciais de grande escala em operação.

Assim, este trabalho tem como objetivo estudar o potencial de utilização de dois combustíveis, sendo um destes de origem fóssil (gás natural) e outro uma biomassa (cavaco de madeira), em uma central termoeletrica.

A ideia principal deste projeto é estudar o ciclo térmico a vapor concentrando-se principalmente em dimensionar os seus equipamentos principais como caldeira e turbina. Para esta situação não existe a necessidade de vapor para processo, a produção total do vapor deve ser utilizada para a geração de energia elétrica. As plantas comerciais semelhantes a este modelo e que se encontram em operação apresentam em média capacidade de 15 MW – 35 MW, assim, será adotado para o modelo a ser desenvolvido neste trabalho uma planta de geração de 20 MW.

Faz parte do escopo uma discussão sobre as características dos combustíveis envolvidos, o gás natural e o cavaco de madeira, e também uma análise para determinar uma proporção eficiente ou ótima da queima destes combustíveis na caldeira.

O objetivo final é alcançar uma configuração de planta que garanta maior eficiência global do processo, realizando para isso uma análise técnico-econômica de viabilidade da planta.

Resumindo, este trabalho tem a intenção de estudar e caracterizar possíveis configurações de uma planta de geração termoeletrica a vapor por ciclo Rankine com capacidade de 20MW de energia elétrica utilizando como combustíveis o cavaco de madeira e o gás natural.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Considerações Gerais

Muitos trabalhos sobre geração termoelétrica, biomassa e eficiência energética têm sido publicados em consequência, principalmente, da atual relevância dos temas abordados.

Este capítulo apresenta algumas definições encontradas na literatura e que são necessárias para a compreensão do processo industrial da combustão da biomassa de cavaco de madeira e do gás natural em uma central termoelétrica.

São citados alguns princípios básicos da termodinâmica clássica e também métodos de funcionamento dos principais equipamentos para o ciclo de Rankine. Como por exemplo: caldeira, turbina a vapor, condensador, bombas, desaerador e pré-aquecedor.

Também são expostas e analisadas algumas possíveis alternativas apresentadas na literatura para o sistema de pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira e para o sistema de condensação de vapor com o objetivo de melhorar a eficiência energética da central.

Esta revisão bibliográfica também descreve as principais características sobre os combustíveis, como por exemplo: composição química, poder calorífico, massa específica e umidade. Em seguida é realizada uma breve discussão sobre os valores encontrados na literatura para as características do gás natural e da biomassa de cavaco de madeira.

Por fim são expostos alguns comentários pertinentes sobre a eficiência energética das centrais termoelétricas e os efeitos destas centrais sobre o meio ambiente.

Em alguns dos trabalhos encontrados houve uma enorme semelhança e harmonia com o tema de enfoque desta monografia, assim, estes trabalhos são citados a seguir e compõem parte desta revisão bibliográfica.

2.2 Biomassa

Biomassa é toda forma de vida vegetal existente acima da superfície utilizada como fonte de energia (MARTINS, 2006). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define a biomassa como todo recurso renovável constituído principalmente de substâncias de origem orgânica (de origem vegetal ou animal) (ANEEL, 2005 apud DANTAS, 2010).

Como toda a energia acumulada nestas substâncias orgânicas vem de processos biológicos que utilizam a energia solar, a energia da biomassa é considerada renovável. De forma a se distinguir dos combustíveis fósseis, a biomassa pode ser definida como um recurso natural que é renovável em um curto período de tempo.

É crescente o uso deste tipo de recurso como insumo energético para obter energia térmica, energia elétrica e também biocombustíveis como, por exemplo, o etanol.

A biomassa que admite conversão térmica, como através de combustão, gaseificação ou pirólise, é considerada a fonte de energia renovável com maior potencial para suprir a necessidade projetada de geração de energias renováveis estabelecida para a sociedade moderna.

O uso da biomassa como combustível apresenta algumas vantagens e desvantagens em comparação com o uso de combustíveis fósseis. Algumas destas estão descritas abaixo:

Vantagens:

- Fonte de energia renovável em um curto período de tempo, como por exemplo o período entre safras;
- Baixas emissões líquidas de CO₂, quando considerado o balanço energético desde a produção até o consumo;
- Menor volume de emissões de óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre, redução dos impactos ambientais locais, regionais e globais;
- Baixo custo de compra ou produção;
- Criação de emprego no campo e na indústria para a produção local de bens e insumos, redução da pobreza, maior acesso à energia;

- Garantia de suprimento de energia sustentável a longo prazo e aumento de mercados produtores, evitando a necessidade de combustíveis fósseis oriundos de mercados externos (segurança de suprimento).

Desvantagens:

- Menor poder calorífico e alta umidade;
- Maior investimento em equipamentos para remoção de material particulado;
- Dificuldade em estoque e armazenamento.

As biomassas de uso mais frequente como recurso energético são: a cana de açúcar, a soja, o milho, a beterraba, a biomassa florestal, os óleos vegetais, o licor negro, os resíduos rurais e agroindustriais e os resíduos sólidos urbanos.

2.2.1 O cavaco de madeira e seu uso energético

Madeira e resíduos florestais e agrícolas são algumas das principais fontes de energia renováveis disponíveis como forma de vida vegetal.

Em 2009, de acordo com EPE (2010) citada por Cortez (2011) o Brasil produziu e consumiu 79,4 milhões de toneladas de lenha. Deste total, 25,9 milhões de toneladas foram transformadas: 25,2 milhões para a produção de carvão vegetal e 712 mil para a geração de energia elétrica.



FIGURA 2.1: CAVACO DE MADEIRA. FONTE: [HTTP://WWW.COOPERMITI.COM.BR/EDUCACAO/CAVACO.PDF](http://www.coopermiti.com.br/educacao/cavaco.pdf)

2.3 Conversão Térmica

De acordo com Nogueira e Lora (2003) citados por Cortez (2011) os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em três grupos: processos físicos, termoquímicos e biológicos. O processo analisado neste trabalho, e descrito na seção 2.3.1, é a combustão, que faz parte do grupo de processos térmicos, assim como a pirólise e a gaseificação, que não serão abordados neste projeto.

Diversos estudos têm sido realizados para obter melhor desempenho e eficiência dos processos de conversão térmicos. Os produtos destes processos são combustíveis, substâncias químicas e eletricidade.

Dependendo da aplicação final e do método de conversão térmico utilizado, é necessário que a biomassa sólida dos resíduos, que no caso deste trabalho é a madeira, seja pré-tratada transformando estes resíduos em uma forma energética mais homogênea para que possa ser utilizada em algum processo de conversão.

Assim, muitas vezes os processos térmicos estão associados a processos de pré-tratamento físico das biomassas para que sejam obtidos combustíveis mais homogêneos. Para o caso da madeira, que é objeto deste estudo, os processos de homogeneização mais frequentes são a briquetagem, peletização, moagem e produção de cavacos.

Tais processos não alteram o poder calorífico da biomassa, apenas aumentam a densidade energética (que pode se tornar comparável à do carvão mineral) e diminuem a umidade até a faixa entre 6 e 10% em base úmida (CORTEZ, 2011).

Logo, deve ser considerado que as formas de conversão físicas utilizadas para o pré-tratamento da biomassa garantem uma série de melhorias, como por exemplo: redução nos custos associados ao transporte e armazenagem, garantia de melhor eficiência na utilização dos equipamentos do processo, a combustão se torna mais completa e também ocorre a redução do calor de vaporização, melhorando assim as características da queima em geral. Além disso ocorre redução na emissão de material particulado.

2.3.1 Combustão da Biomassa

A combustão é um dos processos térmicos disponível para conversão da biomassa em uma forma de energia mais proveitosa. Este processo tem como produto o calor, que é obtido através da queima da biomassa em uma caldeira adequada, em seguida esse calor pode impulsionar uma turbina e produzir eletricidade.

Nogueira, Lora (2003) citados por Cortez (2011) afirmam que “a queima direta, ou a combustão é a tecnologia de conversão mais antiga e mais difundida comercialmente [...]”. Através da reação dos elementos constituintes do combustível com o oxigênio, em maior parte das vezes procedente do ar, ocorre a transformação da energia química contida no combustível em calor. Esta reação é conhecida como reação de combustão e é exotérmica.

Combustão de biomassa é amplamente praticada comercialmente para fornecer calor e energia. O calor produzido deve ser utilizado imediatamente para aquecimento e/ou geração de energia visto que o armazenamento não é uma opção viável (tradução nossa, BRIDGWATER 2003).

Eficiências globais para plantas de geração de energia tendem a ser bastante baixas, tipicamente 15% para pequenas usinas e até 30% para plantas maiores e mais recentes (tradução nossa, BRIDGWATER 2003).

Considerando a biomassa de madeira, objeto deste estudo, o modo mais prático, simples e econômico de obter energia deste combustível é através da combustão direta da própria madeira ou de seus rejeitos. Deste modo, na utilização do cavaco da madeira ocorrem reações termoquímicas na caldeira que liberam a energia química disponível no cavaco para obter vapor e energia elétrica.

Emissões de gases poluentes e tratamento de cinzas são alguns dos problemas técnicos decorrentes do uso da combustão de biomassa.

A figura 2.2 abaixo representa um esquema típico de planta de queima direta da biomassa com caldeira - turbina a vapor - gerador, para obter calor e energia elétrica. Diversos outros modelos de disposição de equipamentos podem ser adotados em uma planta de ciclo a vapor.

Num ciclo com turbina a vapor, como na figura 2.2, são necessários diversos equipamentos para alimentar a turbina com vapor e para tratar o vapor que sai da

turbina, para que este complete o ciclo de Rankine, descrito no item 2.5.1.1. Na figura os equipamentos utilizados foram: caldeira e chaminé, turbina a vapor e conjunto gerador, trocador de calor ou condensador, desaerador, aquecedor e bombas de alimentação da caldeira e de condensado. A instalação deste conjunto de equipamentos é relativamente complexa mas as tecnologias de fabricação e operação são bastante difundidas e conhecidas comercialmente.

A maior vantagem dos ciclos a vapor é a possibilidade do uso de diversos combustíveis conforme tecnologia da caldeira utilizada. Estes combustíveis podem ser os mais nobres, como gás natural, ou os degradados, como resíduos industriais.

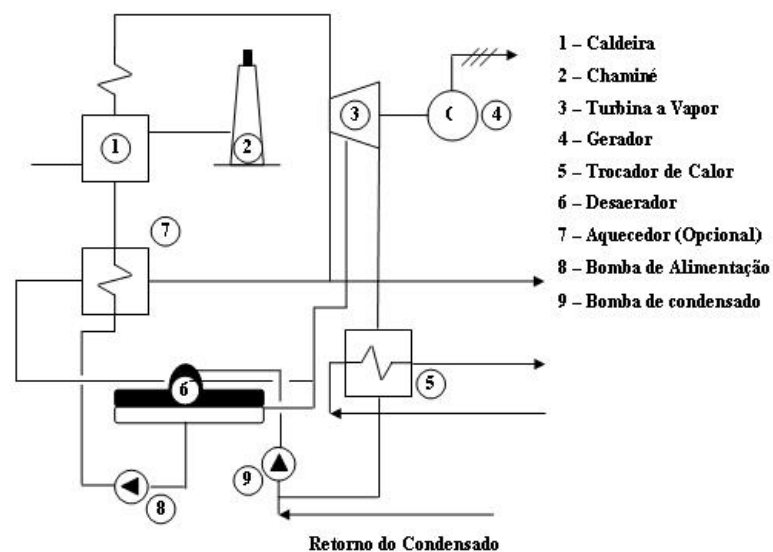


FIGURA 2.2: PLANTA DE COMBUSTÃO. FONTE: SCHIMTZ E KOCH, 1996 APUD MARTINS, 2006.

Plantas a vapor podem operar em cogeração (figura 2.3 lado direito), quando apresentam geração final de energia e vapor, ou sem cogeração (figura 2.3 lado esquerdo), quando apresentam apenas geração final de energia ou apenas geração final de vapor para processo.

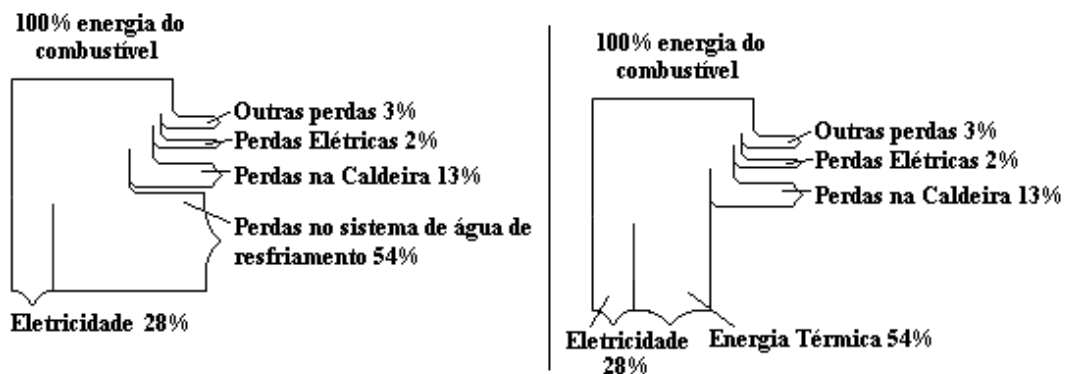


FIGURA 2.3: BALANÇO TÉRMICO DE TURBINA A VAPOR. FONTE: SCHIMTZ E KOCH, 1996 APUD MARTINS, 2006.

Em Ernhart et al (2011) é apresentada uma análise de desempenho para uma planta de biomassa em Ciclo de Rankine Orgânico CRO, tecnologia muito comum e frequente na europa. No CRO uma planta opera da mesma forma que um ciclo Rankine comum mas utiliza um meio de trabalho orgânico em vez de água (OBERNBERGER, 2002). A planta foi projetada para produção máxima anual de 35.000MWt onde a caldeira queima 8MWth de cavaco e resíduos de madeira com diferentes qualidades. A caldeira é considerada o principal equipamento do sistema de conversão da energia e sua eficiência tem grande influencia sobre a eficiência global do sistema. O objetivo de Ernhart era maximizar eficiência na combustão e assim a rentabilidade de projetos de bioenergia. De acordo com o fabricante da caldeira a eficiência da planta deveria chegar a 91% mas em campo este valor só foi atingido quando ocorreu queima de combustível de boa qualidade e alto poder calorífico, cerca de 19MJ/kg (base seca) e teor de humidade abaixo de 45%.

O grau geral de eficácia para uma planta pode ser quantificado utilizando os valores de referência apresentados na literatura. Um dos valores de literatura citados por Erhart et al (2011) foi calculado em Good e equivale a uma média da eficiência de 30 plantas de biomassa com sistema de CRO na Suíça. A maioria dos sistemas atingiu grau de eficiência entre 70 e 80%.

A análise realizada por Erhart et al (2011) para o sistema CRO não conseguiu provar que esta tecnologia tem baixo custo de operação, como seria esperado em um sistema de baixa pressão que não requer mão de obra permanente. Verificou-se alto custo de operação durante os cinco primeiros ano de operação da planta. Problemas como obstruções por congelamento de cavaco no sistema de combustível também contribuem para este alto custo.

Segundo a análise de Bridgwater (2003), para projetar plantas de biomassa para geração de energia alguns obstáculos não técnicos devem ser superados de forma a viabilizar econômica e comercialmente o investimento. A tecnologia utilizada deve ter baixo risco e bom retorno financeiro e para que isto seja obtido são necessários incentivos para adquirir produtos, taxaço sobre combustíveis fósseis ou outras politicas governamentais. Outro obstáculo de extrema importância é a escala, quanto maior o processo construído mais barato será o custo por unidade de energia vendida. A biomassa necessita de grandes áreas de cultivo, uma planta de 10MWe operando com eficiência de 35% requer 40.000 toneladas por ano de

madeira em base seca que equivale a 4.000ha de terra ou 40km² cultivados. O valor de área cultivada pode diminuir conforme a rotação do plantio.

2.4 Principais Características dos Combustíveis – a madeira

O rendimento energético de um processo de combustão da madeira depende de sua constituição química, onde os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam com a espécie (...) (QUIRINO et al, 2005). Além da composição química diversas outras características diferem os combustíveis entre si e os caracterizam como melhores ou piores combustíveis.

O potencial energético da biomassa depende de fatores como as propriedades físicas e químicas, composição química, custo da biomassa seca, energia disponível em poder calorífico, quantidade de resíduos gerados e teor da umidade.

QUIRINO et al (2005) citando BRITO & BARRICHELO (1978) que citam Junge (1975), Arola (1976) e Corder (1976), indicaram o poder calorífico, o teor de umidade, a densidade e a análise imediata como as propriedades mais importantes da madeira para sua utilização como combustível.

Algumas destas propriedades, que classificam os combustíveis, estão descritas a seguir.

2.4.1 Poder Calorífico

O poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira (JARA, 1989 apud QUIRINO et al, 2005). No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma, segundo BRIANE & DOAT (1985) citado por (QUIRINO et al, 2005).

Existem duas formas de poder calorífico o superior e o inferior.

O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE & DOAT, 1985 apud QUIRINO et al, 2005).

O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989 apud QUIRINO et al, 2005).

Para este trabalho, que estuda um ciclo térmico a vapor, foram adotados dois combustíveis para queima em caldeira dual-fuel, o gás natural e o cavaco de madeira. A seguir são informados alguns valores de poder caloríficos obtidos da literatura e de fabricantes.

Em Quirino et al (2005) foi realizado um estudo para medição de valores de poder calorífico inferior e superior, assim como valores de densidade básica e teor de umidade para um grande número de espécies florestais. No artigo são apresentados valores do poder calorífico superior (PCS) para 240 espécies florestais e valores de densidade básica (Db) para 108 destas espécies. A tabela 2.1 abaixo, apresenta alguns desses valores de PCS para as espécies de eucaliptos e pinheiros. A tabela 2.2 apresenta valores de PCS, poder calorífico inferior (PCI) e teor de umidade para algumas espécies selecionadas.

Segundo algumas empresas consultadas que comercializam biomassa de madeira, como cavacos florestais, cavacos de serraria ou lenha em pellets, o valor de transporte da biomassa corresponde a aproximadamente 30% do valor final do produto. O valor médio obtido para a compra de cavaco florestal de eucalipto com PCI de 2.600 a 2.800 kcal/kg, densidade 350 kg/m³, umidade de 35%, no estado de São Paulo, região de Limeira, é de R\$100,00/ tonelada (frete já incluso neste preço).

Conforme dados da Aalborg industries, fabricante de caldeiras, o valor de PCI de cavaco de eucalipto utilizado para dimensionamento de caldeiras é de 4.300 kcal/kg, para cavacos de pinho o PCI é de 2.500 kcal/kg.

Assim, nota-se entre as tabelas 1 e 2 coletadas na literatura, as informações de fabricantes de equipamentos e as informações de vendedores de biomassa grande disparidade de valores para o PCI do cavaco de eucalipto e de pinho. Esta disparidade pode ocorrer devido à uma série de motivos, como a variação nos valores de umidade e homogeneidade para algumas das amostras utilizadas.

Tabela 2.1: Poder calorífico superior de espécies florestais (eucaliptos e pinheiros). Fonte: Selecionado de QUIRINO et al, 2005.

Nome científico	Nome comum	PCS (kcal/kg)
<i>Eucalyptus alba</i>	Eucalipto	4.657 ³
<i>Eucalyptus botryoides</i>	Eucalipto	4.760 ²
<i>Eucalyptus cinerea</i>	Eucalipto	4.653 ³
<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalipto	4.733 ³
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucalipto	4.501 ³
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucalipto	4.629 ³
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucalipto	4.682 ³
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucalipto	4.790 ³
<i>Eucalyptus gummifera</i>	Eucalipto	4.935 ³
<i>Eucalyptus longifolia</i>	Eucalipto	4.809 ²
<i>Eucalyptus maculata</i>	Eucalipto	4.512 ²
<i>Eucalyptus microcorys</i>	Eucalipto	4.940 ³
<i>Eucalyptus pellita</i>	Eucalipto	5.023 ³
<i>Eucalyptus pilularis</i>	Eucalipto	4.989 ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	4.580 ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	4.610 ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	4.622 ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	4.655 ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	4.799 ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	4.889 ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	4.674 ²
<i>Eucalyptus spp</i>	Eucalipto	4.217 ⁵
<i>Eucalyptus tereticomis</i>	Eucalipto	4.661 ³
<i>Eucalyptus triantha</i>	Eucalipto	4.949 ³
<i>Eucalyptus urophila</i>	Eucalipto	4.422 ³
<i>Eucalyptus urophila</i>	Eucalipto	4.480 ³
<i>Eucalyptus urophila</i>	Eucalipto	4.595 ³
<i>Eucalyptus viminalis</i>	Eucalipto	4.691 ³
<i>Pinus caribea</i>	Pinheiro	4.929 ⁵
<i>Pinus cubensis</i>	Pinheiro	5.057 ⁵
<i>Pinus elliottii</i>	-	4.786 ³
<i>Pinus maestrensis</i>	Pinheiro	4.844 ⁵

Tabela 2.2: Poder calorífico superior, poder calorífico inferior e teor de umidade de resíduos ligno-celulósicos (eucaliptos, pinheiros e outros). Fonte: Selecionado de QUIRINO et al, 2005.

Nome comum	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	TU(%)
Eucalyptus sp	4525	3854	10,5
Costaneiras de Pinus sp ⁽²⁾	4978	4122	12,9
Costaneiras de Pinus sp ⁽³⁾	4720	3894	12,9
Costaneiras de Pinus sp ⁽⁴⁾	5036	4174	12,9
Pó de serra	4.880	-	-
Aparas de madeira	4.800	-	-
Usina de compensado	4.424	-	-

PCI – Poder calorífico inferior

TU – teor de umidade

⁽²⁾ Madeira com casca

⁽³⁾ Madeira

⁽⁴⁾ Casca

Tabela 2.3: Poder Calorífico Superior de alguns combustíveis. Fonte: Martins, 1980 apud Cortez, 2011.

Combustível	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)
Carvão vegetal	7.100
Lignito	4.000
Madeira (25 a 30% de umidade)	3.500
Madeira seca	4.700 a 5.000
Óleo combustível	9.800
Parafina	10.400

Assim, o melhor valor a ser utilizado para a biomassa de cavaco de madeira de eucalipto ou pinho é o obtido através da análise química de determinada amostra a ser utilizada no processo industrial. Os valores teóricos coletados variaram entre 2.600 – 5.023 kcal/kg para cavaco de eucalipto e 2.500 – 5.057 kcal/kg para cavaco de pinho.

O valor de PCI informado pela Aalborg industries para dimensionamento de caldeiras considerando como combustível o gás natural é de cerca de 9.065 kcal/Nm³.

De acordo com a Deliberação ARSESP N° 283, de 08-12-2011, que dispõe as tabelas tarifárias a serem utilizadas pela Companhia de Gás de São Paulo, Comgás, o valor de PCI para o gás natural comercializado pela empresa para fins industriais, cogeração e termoelétricas é de 9.400 kcal/m³, à temperatura de 20°C e 1 atm.

A tabela 2.3 acima apresenta valores do poder calorífico superior, PCS, para alguns combustíveis como madeira e derivados de petróleo. Através desta tabela é possível perceber que os derivados de petróleo, como parafina e óleo combustível apresentam poder muito superior como combustível quando comparados as biomassas, como por exemplo a madeira.

2.4.2 Umidade

Segundo Earl (1975), citado por Cunha et al. (1989) e Quirino et al (2005) é importante que o teor de umidade da madeira a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível.

Conforme é descrito por Quirino et al (2005) para entrar em combustão e ser queimada em forno a madeira deve apresentar umidade de no máximo 65% na base úmida, ou necessitará de mais energia para entrar em combustão. Qualquer umidade da madeira resulta em perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água pois a umidade evapora da madeira e absorve energia em combustão.

Segundo Cunha et al. (1989) citado por Quirino et al (2005), quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia em combustão.

Nas regiões tropicais, a madeira é cortada de três a quatro meses antes de ser queimada e nas regiões temperadas, de seis meses a um ano. Tais períodos são suficientes para reduzir a umidade em até 30% (Martins, 1980 apud Cortez, 2011).

2.4.3 Composição Química

Tillman (1978), citado por Cunha et al. (1989), citado por Quirino et al (2005), considera que a estrutura física não é um importante parâmetro na determinação do valor energético das madeiras, mas a composição química é de crítica importância.

A madeira é constituída aproximadamente de 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio independentemente da espécie, diferenças genéticas ou idade (MARTINS, 1980 apud CORTEZ, 2011).

Freitas (1977), citado por Cunha et al. (1989), citado por Quirino et al (2005), relata que a variação na composição química, dimensões, forma e arranjo dos

elementos anatômicos e a ocorrência de extrativos acarretam uma diferenciação nas características energéticas de várias madeiras.

Quimicamente a madeira é heterogênea, sendo constituída principalmente por três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, numa proporção de cerca de 50:20:30 (MARTINS, 1980 apud CORTEZ, 2011).

Segundo Jara (1989), citado por Quirino et al (2005), o poder calorífico superior da madeira, além da umidade, está muito influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc).

Browning (1963), citado por Cunha et al. (1989), citado por Quirino et al (2005), afirma que o poder calorífico é mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos, porque os mesmos contêm menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose).

Para a composição química da madeira os produtos da sua combustão são: CO₂ e água, fuligem e cinzas. Quando a combustão é completa estes produtos são resultados do carbono e hidrogênio do combustível. Quando a queima é incompleta além destes também são liberado nitrogênio, oxigênio e monóxido de carbono resultantes do excesso de ar não consumido na queima.

2.4.4 Massa Específica

A massa específica é um dos principais índices de qualidade da madeira e, segundo Brasil (1972), citado por Vale (2000a), os métodos que se apóiam na massa específica básica, são os que mais satisfatoriamente mede a quantidade de substância madeira por unidade de volume (QUIRINO et al, 2005).

Segundo Cunha et al. (1989) citado por Quirino et al (2005) não há correlação entre densidade básica e o poder calorífico. Entretanto, em relação ao volume de madeira a ser queimada a densidade está positivamente relacionada com o conteúdo calórico da madeira, estimulando o interesse de madeiras pesadas para a queima.

2.5 Central Termelétrica

Em uma central termelétrica uma fonte de energia primária alimenta uma máquina térmica que, através de uma reação de combustão, transforma a energia química do combustível em energia mecânica obtida no eixo da turbina, que em sequência é convertida em energia elétrica por meio de geradores elétricos.

Conforme Moran e Shapiro (2002) em uma central termelétrica é produzido sequencialmente calor (energia térmica ou vapor de processo) e potência (energia elétrica e/ou mecânica) com o objetivo de obter melhor eficiência durante o processo de transformação das energias.

Segundo Martins (2006) centrais termelétricas compõem uma unidade de geração exclusiva de energia elétrica a base de motor alternativo, turbina a gás ou turbina a vapor, ou combinação destes em ciclo simples ou combinado, sem processo de aproveitamento do calor.

A característica principal de um ciclo combinado é o aproveitamento do calor exausto de uma máquina térmica para geração de vapor que realizará trabalho mecânico em uma segunda máquina térmica. Assim, não deve ser caracterizada como uma cogeração, onde ocorre geração de eletricidade e vapor para processo. Entretanto, uma termelétrica pode ganhar desempenho quando associada à cogeração.

A tecnologia usada com mais frequência na conversão do calor obtido a partir da queima da biomassa em energia mecânica ou elétrica consiste nos ciclos termodinâmicos de potência, conhecidos como ciclo a vapor, cujo precursor é o Ciclo de Carnot (SONNTAG et al, 2003).

A configuração mais simples para ciclos a vapor é constituída por: caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba de alimentação da caldeira, que corresponde ao ciclo de Rankine. Do ciclo de Rankine derivam outras possíveis configurações de ciclos, outros equipamentos podem ser adicionados e outras disposições podem ser adotadas. Possíveis variações são o ciclo com reaquecimento ou o regenerativo.

A configuração básica é alterada de acordo com as características do ciclo desejado. Propriedades técnicas que determinam a configuração são: quantidade e qualidade da biomassa que será queimada na caldeira e necessidades energéticas ou de processo.

As usinas termoeletricas (UTES) são parte significativa da geração de energia elétrica no Brasil. De acordo com ANEEL (2010) citado por Cortez (2011), 23% da capacidade instalada da matriz elétrica brasileira provém de UTES, perdendo apenas para a hidroeletricidade, responsável por 67,4% dos 117,9 GW totais. O gás natural é o principal combustível das UTES, responsável por 45% da capacidade instalada, seguido pela biomassa com 26%.

No caso das UTES, a biomassa é responsável por 7 GW. Os resíduos de madeira são os combustíveis de 35 empreendimentos com 302,6 MW de potência total fiscalizada (CORTEZ, 2011).

Segundo Cortez (2011) em Zolling, na Alemanha, há uma usina geradora de energia da incineração de resíduos de madeira em geral com capacidade de 20 MW. A usina recebe cerca de 700 toneladas por dia já trituradas, provenientes de cooperativas e plantas de reciclagem de Munique. Os resíduos são transportados em caminhões fechados e ficam armazenados em silos. Os gases de exaustão são tratados para a retirada de dioxinas e mercúrio.

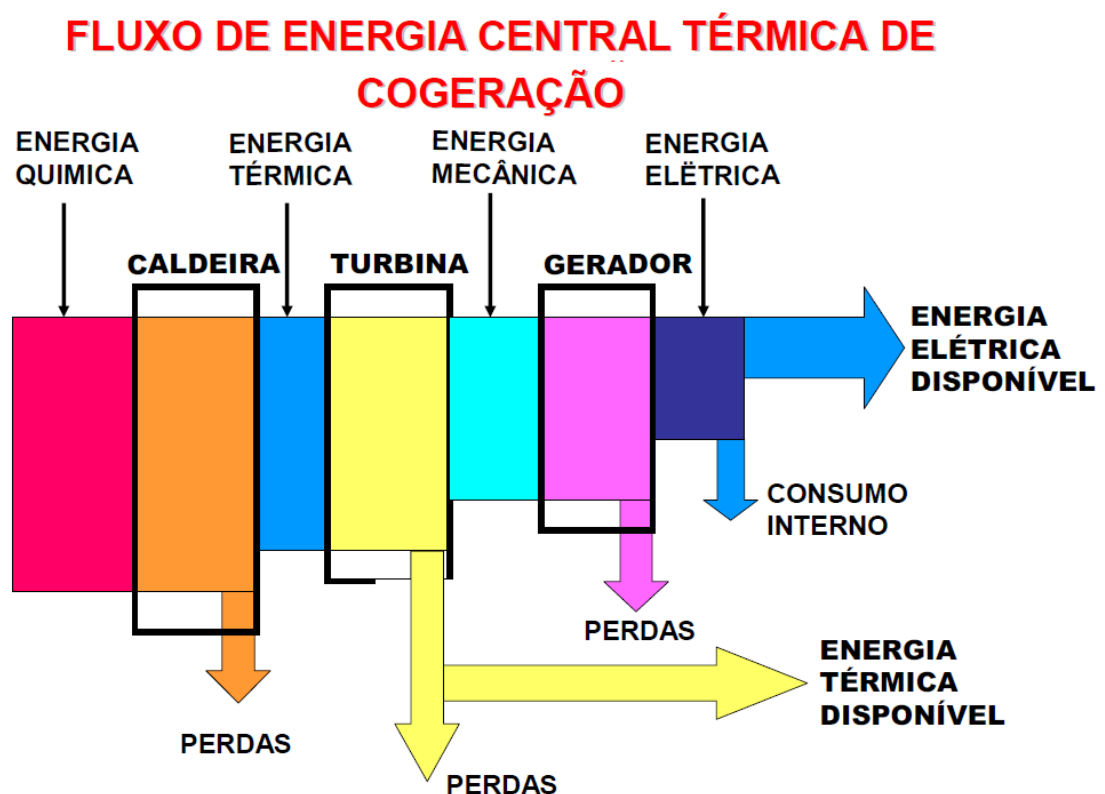


FIGURA 2.4: FLUXO DE ENERGIA DE UMA CENTRAL TÉRMICA COM COGERAÇÃO (DISPONIBILIDADE DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA). FONTE: RINO, 2008.

2.5.1 Termodinâmica

Os princípios da termodinâmica é a base utilizada para avaliação de processos de conversão de energia. Esta ciência possui leis que permitem quantificar o sistema e qualificar a energia gerada. A teoria básica para o estudo e desenvolvimento de uma central termoelétrica é a termodinâmica clássica, assim, diversos dos seus princípios serão expostos.

Originada das palavras gregas *therme* (calor) e *dynamics* (força), a hoje conhecida como Termodinâmica, apresenta-se como objeto de estudo desde a Antiguidade (MORAN E SHAPIRO, 2002).

Conforme Moran e Shapiro (2002), a Termodinâmica considera estudos sobre a força motriz do calor, ou seja, a capacidade que os corpos quentes têm de produzir trabalho.

Desde o surgimento da primeira máquina a vapor, durante a Revolução Industrial, o mundo tem vivido uma preocupação constante em busca de melhorias na performance das máquinas e de diversas tecnologias (DANTAS, 2010).

O francês Sadi Carnot (1796-1832), fundador da Termodinâmica, começou seus estudos termodinâmicos com a intenção de obter máquinas a vapor mais eficientes (NASCIMENTO; BRAGA; FABRIS, 2004 apud DANTAS, 2010). Em seus trabalhos Carnot apresenta a relação entre calor e trabalho e descreve a direção de transferência de calor, da fonte quente para a fonte fria, além de indicar perdas.

Através de conceitos atuais, Levenspiel (2002) citado por Dantas (2010) explica que o calor pode ser adicionado ou retirado do sistema por contato com um corpo mais quente ou mais frio, e o trabalho representa todas as outras formas de mudança de energia quando se executa a remoção ou adição de calor.

A Primeira Lei da Termodinâmica (PLT), conhecida como Lei da Conservação de Energia, diz que a energia não pode ser criada ou destruída, só é possível transformá-la de uma forma para outra, ou transferi-la entre sistemas (MORAN E SHAPIRO, 2002; SONNTAG et al, 2003).

A PLT indica então que a massa e a energia são conservadas. Em um sistema não isolado pode ocorrer transferências de energia na forma de calor (Q) ou por trabalho (W).

Quando um sistema é fechado não existe entrada ou saída de massa do sistema, e a primeira lei pode ser indicada pela equação 1 a seguir (DANTAS, 2010):

$$\Delta \dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.1)$$

A PLT mostra, através da equação 1, que a variação de energia do sistema é igual a diferença entre o calor cedido ao sistema pelo trabalho realizado pelo sistema.

Para avaliar sistemas energéticos abertos utilizando a PLT, é usual fazer um balanço de massa e energia, pois em todo sistema podem existir fluxos de entrada e saída de massa, de calor e de trabalho.

A 2ª Lei da Termodinâmica estabelece a direção da transferência de calor e limites para as eficiências resultantes dos processos de conversão de energia térmica em trabalho.

$$\eta = \frac{\tau}{Q_Q} = \frac{Q_Q - Q_F}{Q_Q} = 1 - \frac{Q_F}{Q_Q} \quad (2.2)$$

Conforme se pode observar em Van Wylen (1995), citado por Paro (2011), os estudos dos ciclos termodinâmicos em centrais termoelétricas são aplicação direta dos conceitos da PLT, segundo a qual todo o calor transferido para um sistema é equivalente ao trabalho realizado pelo mesmo somado à energia acumulada pelo sistema na mudança de estado; e da 2ª Lei da Termodinâmica, segundo a qual é impossível construir um ciclo que mude de um estado inicial para outro e retorne ao mesmo estado inicial sem sofrer perdas energéticas. É possível também observar os conceitos de irreversibilidade e disponibilidade, diretamente relacionados ao conceito de eficiência térmica de um determinado sistema.

2.5.1.1 Ciclo de Rankine

As centrais termelétricas podem operar em ciclo de Rankine, Brayton e Combinado. Os ciclos apresentam transformações dos fluidos e seus estados são indicados pela temperatura, pressão e volume. De acordo com cada processo duas variáveis são controladas de modo que o fluido percorra um ciclo. Para as termelétricas o controle dos fluidos ocorre através da variação de pressão e temperatura.

Os rendimentos elétricos dos ciclos variam de 20% a 50%, aumentando na seguinte ordem: Rankine, Brayton e Ciclo Combinado. O rendimento do ciclo aumenta também com o aumento da potência (MARTINS, 2006).

O ciclo de Rankine convencional é composto de uma caldeira de geração de vapor superaquecido, uma turbina a vapor, um condensador, bombas e sistema de regeneração com trocadores de calor.

Neste ciclo o calor proveniente da queima dos combustíveis em uma caldeira, onde é gerado o vapor, é enviado a uma turbina a vapor que utiliza o vapor para gerar energia mecânica e/ ou elétrica. Os gases de exaustão ou de extração em uma turbina de condensação podem ser utilizados como calor de processo, embora normalmente apresente baixa pressão. Geralmente este é o ciclo utilizado em cogerações, conforme retrata a figura 2.5 abaixo.

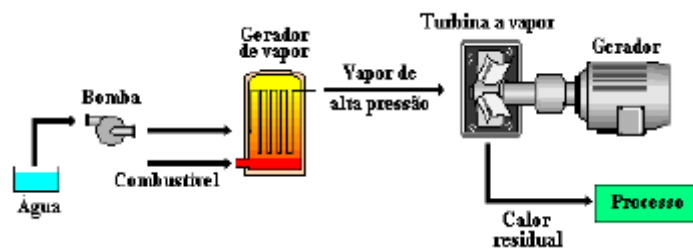


FIGURA 2.5: CICLO RANKINE COM COGERAÇÃO. FONTE: MARTINS, 2006.

Outra característica importante desse sistema é a diversidade dos combustíveis utilizados, pois a queima dos combustíveis será utilizada apenas para geração de vapor, sendo que o fluido de trabalho utilizado é a água (Martins, 2006).

Uma central termelétrica com turbinas a vapor em ciclo Rankine deve possuir quantidade suficiente de água necessária para a alimentação das caldeiras e condensação do vapor.

A grande diferença dos outros ciclos em relação ao ciclo de Rankine é que no ciclo de Rankine o fluido de trabalho apresenta mudanças de fase nos processos que ocorrem à pressão constante.

O processo para o ciclo de Rankine, correspondente ao arranjo indicado na figura 2.6 abaixo, é aproximadamente explicado a seguir:

Inicialmente a caldeira recebe água líquida próxima da saturação e gera vapor superaquecido que alimenta a turbina a vapor. A potência mecânica líquida é obtida subtraindo do trabalho produzido pela turbina o consumo de trabalho das bombas.

O objetivo principal da planta é sempre atender o vapor para processo, caso exista essa necessidade, e em seguida a energia que resta em forma de vapor é transformada em energia elétrica no gerador conectado a turbina.

A figura 2.7 indica o diagrama $T \times S$ (temperatura x entropia) para o ciclo Rankine da figura 2.6. Os pontos indicados no diagrama e que compõe o ciclo são descritos abaixo.

Vapor saturado entra no condensador e produz condensado saturado nas mesmas condições (19-1). A água de resfriamento absorve o calor dissipado. Em seguida a bomba de condensado bombeia o condensado (1-2) para ser pré-aquecido em trocadores de calor (em alguma configurações não são usados esses aquecedores) a baixa pressão (2-5) que geralmente recebem vapor de extrações da turbina. O condensado resultante destes aquecimentos é conduzido ao condensador.

A água segue então para o desaerador, que retira os gases não condensáveis para que os feixes tubulares da caldeira sejam conservados, operando sempre com maior eficiência ao longo de sua vida útil. O desaerador acumula e conserva a água que foi desaerada e encontra-se preparada para a alimentação da caldeira.

A seguir ocorre um aumento de pressão da água na bomba de alimentação da caldeira (5-6) e em seguida, antes de entrar na caldeira, esta água passa por um conjunto de pré-aquecedores de alta pressão (6-9). A sequência de passagem por pré-aquecedores é opcional. A caldeira vai gerar vapor superaquecido (9-11) através da passagem da água pelos seus diversos estágios, nesta sequência: economizador (troca calor com gases de exaustão da combustão), evaporador e superaquecedor.

O vapor superaquecido gerado na caldeira segue para a turbina a vapor (11-19). Esta turbina produz energia mecânica através da expansão do vapor de alta pressão. Parte da energia mecânica é convertida em energia elétrica no gerador.

Resumindo, os processos que compõe o ciclo de Rankine, conforme descrito pelos pontos do diagrama na figura 2.6, considerando apenas os efeitos dos equipamentos essenciais a um ciclo (e não considerando os equipamentos que contribuem em algumas etapas internas, como os pré-aquecedores) são:

- Processo de bombeamento adiabático na bomba;
- Transferência de calor a pressão constante na caldeira;
- Expansão adiabática reversível na turbina a vapor;
- Transferência de calor à pressão constante no condensador.

Concluindo, para a análise termodinâmica em um ciclo de Rankine, o balanço de energia, apresenta as equações a seguir:

Balanço de energia em um ciclo aberto com escoamento em regime permanente e vazão mássica de $m = 1 \text{ kg/s}$, para determinação dos estados ao longo do ciclo:

$$q - w = h_s - h_e \quad (2.3)$$

$$h = u + Pv \quad (2.4)$$

Logo,

$$\text{Caldeira:} \quad q = h_s - h_e \quad (2.5)$$

$$\text{Turbina:} \quad w = h_e - h_s \quad (2.6)$$

$$\text{Condensador:} \quad q = h_s - h_e \quad (2.7)$$

$$\text{Bomba:} \quad w = h_e - h_s \quad (2.8)$$

2.5.2 Equipamentos e sistemas de uma central termelétrica

Sistemas e equipamentos para geração distribuída têm atraído muitos investimentos em pesquisas e em muitos fabricantes que atualmente oferecem tecnologias competitivas para sua implantação e melhoria (FIOMARI et al., 2006 apud DANTAS, 2010).

Os principais equipamentos que compõem os sistemas de uma central termelétrica são descritos a seguir, além dos sistemas acessórios.

2.5.2.1 Pátio de Biomassa

A principal função de um pátio de biomassa é o armazenamento de biomassa e em seguida alimentar a caldeira. Em geral os pátios de secagem são de piso compactado revestido com asfalto ou material semelhante que impeça o contato da biomassa utilizada com o solo. A biomassa é então transportada por correia para um galpão onde é armazenada e parte dela segue, também por correia, para a caldeira.

2.5.2.2 Caldeira

Caldeiras são equipamentos capazes de gerar vapor. Logo são muito utilizadas em situações onde o vapor é necessário, em particular vapor d'água, devido à abundância desta substância. A caldeira recebe água subresfriada e gera vapor saturado ou superaquecido.

As caldeiras podem ser compostas por economizador, tubulão, e superaquecedor. Em cada um desses estágios a água sofre aquecimento até se tornar vapor saturado ou superaquecido. O economizador eleva a temperatura da água de alimentação até a saturação através da troca de calor por convecção com o gás exausto. O tubulão está ligado a feixes tubulares que envolvem a fornalha, onde ocorre troca de calor por radiação e a água é evaporada tornando-se vapor saturado. O superaquecedor é composto por feixes tubulares dentro da caldeira e também na região de exaustão dos gases, assim o vapor é superaquecido.

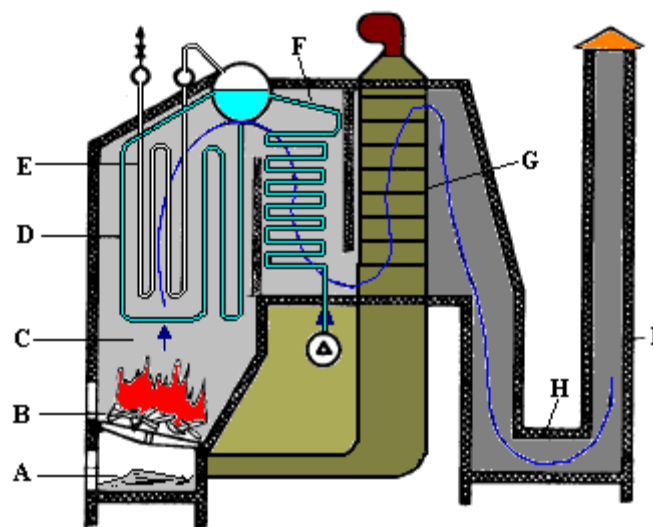


FIGURA 2.8: PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA CALDEIRA. FONTE: MARTINS, 2006.

A figura 2.8 indica os componentes de uma caldeira (MARTINS, 2006):

- a) cinzeiro: em caldeiras de combustíveis sólidos, é o local onde se depositam as cinzas ou pequenos pedaços de combustível não queimado;
- b) fornalha: com grelha ou queimadores de óleo ou gás;
- c) seção de irradiação: são as paredes da câmara de combustão revestidas internamente por tubos de água;

- d) seção de convecção: feixe de tubos de água, recebendo calor por convecção forçada; pode ter uma ou mais passagens de gases;
- e) superaquecedor: trocador de calor que aquecendo o vapor saturado transforma-o em vapor superaquecido;
- f) economizador: trocador de calor que através do calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira aquecem a água de alimentação;
- g) pré-aquecedor de ar: trocador de calor que aquece o ar de combustão também trocando calor com os gases de exaustão da caldeira;
- h) exaustor: faz a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia para vencer as perdas de carga devido à circulação dos gases;
- i) chaminé: lança os gases de combustão ao meio ambiente, geralmente a uma altura suficiente para dispersão dos mesmos.

A caldeira pode ainda ter equipamentos de limpeza dos gases, tais como filtros, ciclones ou precipitadores eletrostáticos para captação de material particulado ou ainda lavadores de gases para captação de gases ácidos, como SO_x e NO_x (MARTINS, 2006).

A pressão de vapor em uma caldeira é função direta da quantidade de energia disponível na fornalha pela queima do combustível e que é transmitida à água. Sendo assim, a pressão interna na caldeira depende fundamentalmente da atuação do queimador (ALTAFINI, 2002).

A perda de vazão é relativa à purga da caldeira que é feita continuamente para evitar a concentração de sais no fluido de trabalho. Com isto, deve ser feita uma reposição de água desmineralizada de mesmo valor (PUC-Rio).

Para uso interno nas caldeiras as águas devem passar por tratamento para alcançar determinada qualidade e assim evitar incrustações sobre as superfícies de aquecimento ou mesmo corrosões. Existem métodos externos e internos de tratamento da água. Clarificação, abrandamento, desmineralização, desgaseificação e remoção de sílicas são alguns dos métodos externos, já a base de fosfato, a base de quelatos, sulfito de sódio, hidrazina e soda são alguns dos métodos internos.

O processo de clarificação tem a intenção de reduzir os sólidos em suspensão e consiste na floculação, decantação e filtração da água. Na desmineralização são utilizadas substâncias sólidas e insolúveis que trocam os seus

próprios íons com os da substância a ser tratada, sem que ocorram alterações de suas características estruturais.

Em caldeiras a energia térmica é liberada através da queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, essa energia deve ser corretamente transferida para as superfícies de absorção de calor.

Após a queima dos combustíveis, os gases quentes gerados pela combustão percorrem o caminho de troca térmica ao longo da caldeira e em seguida são lançados através da chaminé para a atmosfera. A movimentação destes gases ocorre por diferença de pressão.

Dá-se o nome de tiragem ao processo que retira os gases mediante a criação de pressões diferenciais na fornalha (ALTAFINI, 2002). Assim, nas caldeiras pode ocorrer tiragem natural, quando ocorre por chaminé, ou forçada, quando são utilizados ventiladores.

Os fatores limitantes da capacidade de produção de vapor de uma caldeira são as suas dimensões e as propriedades metalúrgicas dos materiais.

Em geral caldeiras possuem grandes riscos de explosões. Caldeiras operantes com carvão, lenha, bagaço de cana, biomassa e outras oferecem ainda, riscos inerentes ao manuseio, armazenagem e processamento do combustível (ALTAFINI, 2002).

Considerando a sua construção as caldeiras podem ser classificadas em flamotubulares ou aquatubulares.

Nas caldeiras flamotubulares os gases circulam por dentro dos tubos e aquecem a água que circula por fora. A troca de calor ocorre por radiação gasosa e convecção. Este tipo de caldeira opera com pressões limitadas pois suas partes internas são submetidas à grandes pressões o que limita o uso de chapas muito espessas. Quando são utilizadas para combustíveis líquidos ou gasosos o queimador é instalado na parte de frente da fornalha.

Já nas caldeiras aquatubulares os gases circulam por fora dos tubos e a água por dentro dos tubos. Estas possuem vasos pressurizados internamente, menores dimensões, operam em pressões mais elevadas e alcançam maior produção de vapor do que as flamotubulares.

Como informado por Altafini (2002), outra característica importante das caldeiras aquatubulares é a possibilidade de utilização de superaquecedores, que

permitem o fornecimento de vapor superaquecido, necessário ao funcionamento das turbinas.

A circulação de água por dentro dos tubos se dá por convecção natural, devido à diferença de densidade existente entre o líquido e o vapor formado (MARTINS, 2006).

O rendimento obtido nas caldeiras aquatubulares é superior ao rendimento encontrado nas caldeiras flamotubulares.

Nas primeiras tem-se obtido rendimento de 80% a 82% ou maiores em caldeiras com superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar, sendo nas últimas impossível superar valores de 75% a 78% nas melhores condições de limpeza (MARTINS, 2006).

Com relação à eficiência das caldeiras, um ponto importante a destacar é o aproveitamento da energia contida no fluxo de gases de exaustão (DANTAS FILHO, 2009). Como já descrito, através do uso de superaquecedores, economizadores e pré aquecimento do ar de combustão.

2.5.2.3 Turbina a Vapor

A turbina a vapor é alimentada por vapor de alta pressão e expande gerando potência mecânica de eixo. O eixo da turbina é acoplado, de um lado, ao gerador e, de outro, a alguma carga mecânica (PUC-Rio).

O acionamento da turbina ocorre pela expansão do vapor de alta pressão, proveniente de uma caldeira convencional. Porém, o vapor proveniente das turbinas é de baixa ou média pressão, sendo utilizado em processos que necessitam de um baixo nível de temperatura. (MARTINS, 2006)

O processo de conversão da energia do combustível inicia-se em torno de 550°C, uma temperatura baixa se comparada com a de uma máquina de combustão interna (MARTINS, 2006).

A tecnologia das turbinas a vapor é bem conhecida, sendo máquinas mais simples do que as turbinas a gás (MARTINS, 2006). Entretanto, quando considerados os equipamentos necessários para compor o ciclo térmico da turbina a

vapor a instalação da planta se torna mais complexa. Os equipamentos necessários para o ciclo com turbina a vapor são: caldeira, trocadores de calor, bombas e outros.

Quanto à construção é possível classificar as turbinas em dois tipos, as turbinas de ação e as turbinas de reação.

As turbinas a vapor podem ser classificadas em três grupos, turbinas de contrapressão, turbinas de condensação e turbinas de extração.

As turbinas de contrapressão são frequentemente utilizadas para fornecer vapor para processo pois os seus gases exaustos possuem pressão igual ou superior à pressão atmosférica e em alguns casos estão no estado superaquecido.

Nas turbinas de condensação os gases de exaustão estão abaixo da pressão atmosférica. Estas turbinas são frequentemente utilizadas em centrais termelétricas ou quando não há necessidade de vapor de baixa ou média pressão para processo.

As turbinas de extração apresentam maior aproveitamento do calor e redução da potência gerada. Estas turbinas apresentam capturas de vapor intermediário para utilização em processo. O vapor ainda não extraído percorre os estágios seguintes da turbina até sofrer exaustão.

O rendimento, para uma mesma potência, do ciclo de uma turbina a gás é algo mais elevado que o de uma turbina a vapor de contrapressão (MARTINS, 2006).

Algumas condições de operação podem trazer consequências ao rendimento das turbinas a vapor. A temperatura de entrada do vapor e a potência da máquina são algumas delas, a turbina apresentará maior rendimento quanto maior for esta temperatura e potência. As variações na carga, que alteram a potência, também afetam a eficiência da turbina.

A turbina da GE apresentada na figura 2.9 possui 3 conjuntos de estágios; alta, média e baixa pressão e é do tipo condensação com exaustão axial, sendo o condensador posicionado axialmente a turbina. Este tipo de configuração é utilizado para turbinas de pequeno a médio porte (de 20 a 100 MW) (PUC-Rio).

Para turbinas de grande porte é utilizada a configuração com dupla exaustão radial e dupla carcaça (uma com os estágios de alta e média pressão e outra com os estágios de baixa pressão) como mostra a figura 2.10, abaixo (PUC-Rio).

Para turbinas a vapor de grande porte, é construída uma estrutura de suportes da máquina, de modo a permitir que o condensador seja posicionado abaixo da mesma (PUC-Rio).

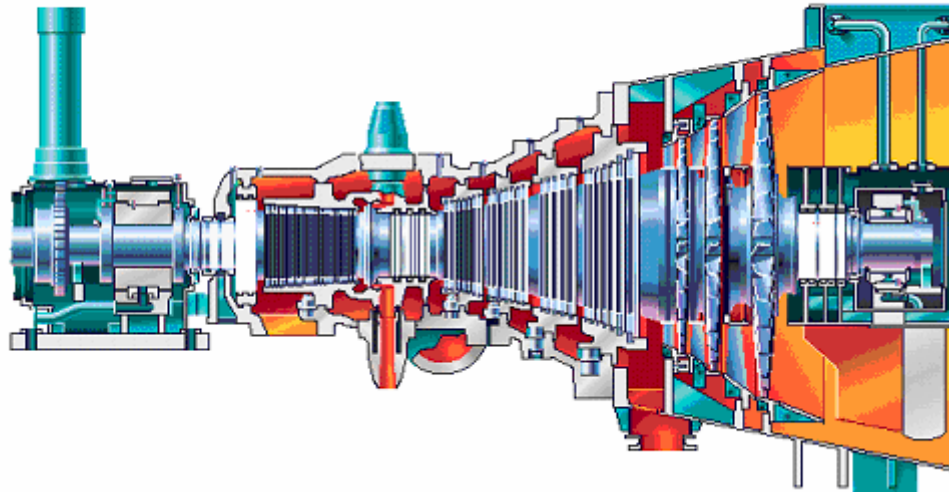


FIGURA 2.9: CORTE DE UMA TURBINA A VAPOR DE CARCAÇA ÚNICA SÉRIE A5/A9 DA GE. FONTE: PUC-RIO

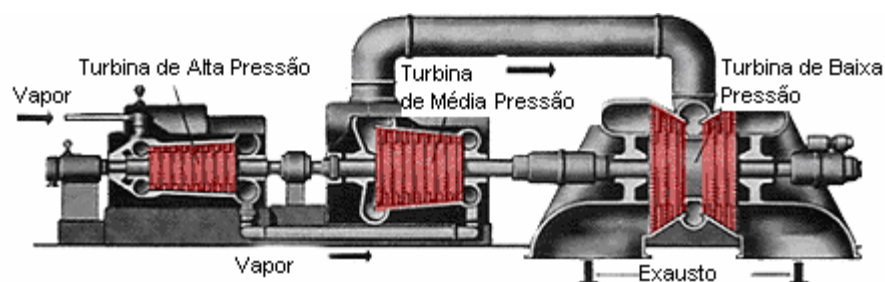


FIGURA 2.10: ESQUEMA DE UMA TURBINA A VAPOR DE GRANDE PORTE. FONTE: PUC-RIO

2.5.2.4 Condensador a água

O condensador recebe vapor exausto da turbina e utiliza água para condensar esse vapor e realimentar o ciclo com condensado (PUC-Rio).

O condensador é resfriado a água. A água circula pelos tubos trocando calor com o vapor vindo da turbina. O calor latente de condensação é transferido para a água de resfriamento. Bombas captam água fria para o condensador (PUC-Rio).

O paragrafo anterior descreve o chamado ciclo aberto de condensação. Em casos de baixa disponibilidade de água ao invés deste sistema é usual instalar uma torre de resfriamento, que é um circuito fechado de resfriamento.

O condensador opera à vácuo, que é mantido por bombas de vácuo ou ejetores a vapor.

Os ejetores utilizam vapor de extração da turbina e têm dupla função; além de manter o vácuo de operação do condensador, retirar parte dos não condensáveis (PUC-Rio).

A Figura 2.11 abaixo representa um esquema de condensador instalado abaixo da turbina a vapor:

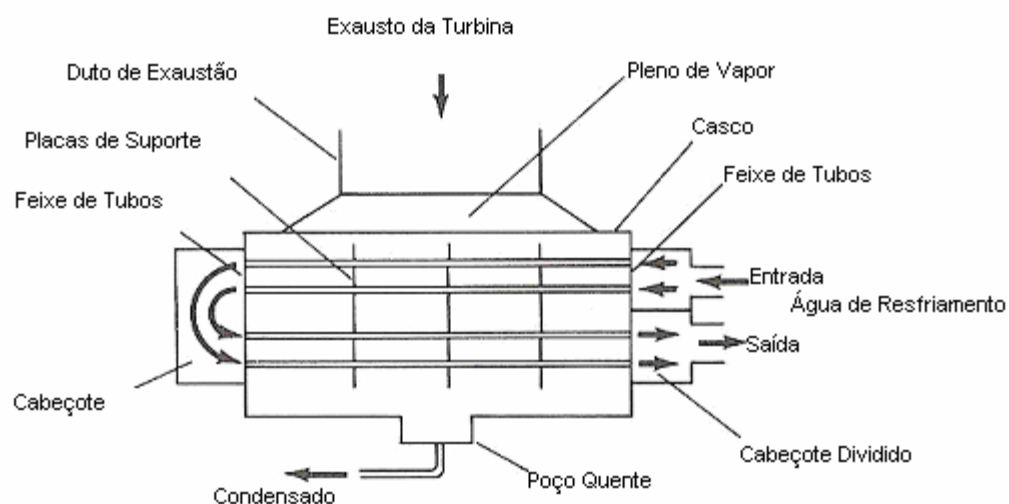


FIGURA 2.11: ESQUEMA DE CONDENSADOR. FONTE: PUC-RIO

2.5.2.5 Bomba de Condensado

Nesta bomba a sucção do condensado que está localizado em um poço abaixo do condensador é realizada a vácuo. A bomba de condensado aumenta a pressão da água (condensado) para a pressão solicitada de operação do desaerador.

Esta bomba é utilizada em casos onde há problemas de NPSH (Net Positive Suction Head) disponível. Tipicamente o bombeamento de condensado apresenta

este problema pois a pressão de sucção da água está próxima da pressão de vapor (PUC-Rio).

Devido ao problema de NPSH a bomba de condensado deve ter um reservatório.

2.5.2.6 Pré-Aquecedores

Os aquecedores de água de alimentação das caldeiras são trocadores de calor. A água passa pelos tubos enquanto o vapor de extrações das turbinas passa por fora dos tubos, aquecendo a água de alimentação das caldeiras e condensando (PUC-Rio).

Em geral todo o condensado obtido nos pré-aquecedores é encaminhado para o desaerador ou para o condensador. O usual é posicionar os pré-aquecedores de alta e baixa pressão separados, considerando que o desaerador se encontra localizado entre eles.

A figura 2.12, apresenta um esquema da operação para um trocador de calor.

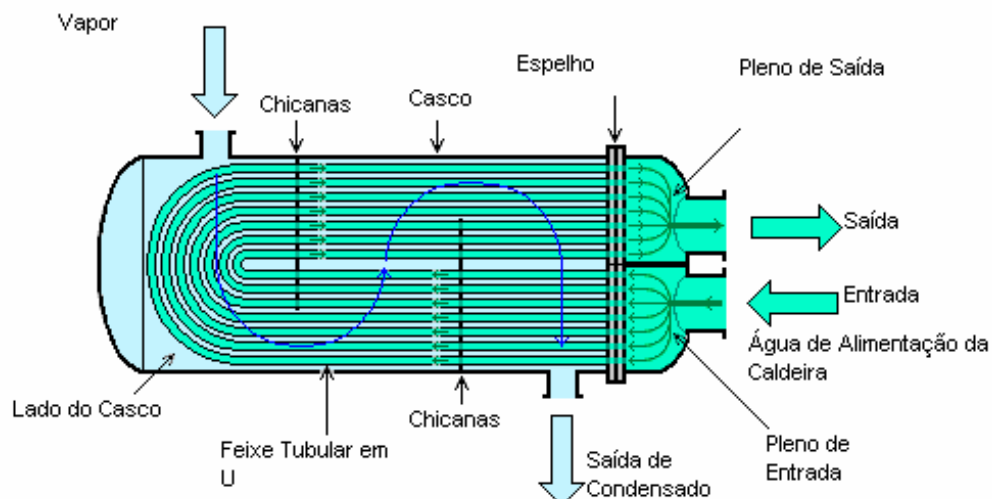


FIGURA 2.12: ESQUEMA DE UM TROCADOR DE CALOR TIPO CASCO E TUBO. FONTE: PUC-RIO

2.5.2.7 Desaerador

O desaerador (Figura 2.13) é composto de uma torre vertical, onde ocorre o processo de arraste dos não condensáveis, e de um vaso horizontal, que funciona como reservatório para a água de alimentação da caldeira (PUC-Rio).

A função do desaerador é, de certa forma, realizar mais uma limpeza da água de alimentação para evitar danos na caldeira, ele retira os gases não condensáveis da água utilizando vapor de extração para arraste do ar da água. Assim, os vapor de extração carrega os não condensáveis para a atmosfera.

Além de retirar não condensáveis, o desaerador promove aquecimento da água e funciona, também, como um reservatório que possibilita a sucção das bombas de alimentação da caldeira (PUC-Rio).

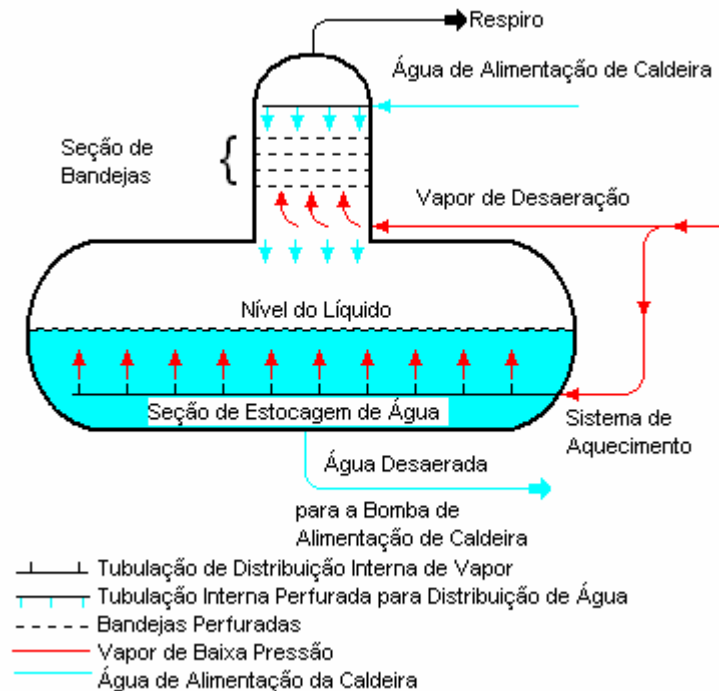


FIGURA 2.13: ESQUEMA DE DESAERADOR. FONTE: PUC-RIO

2.5.2.8 Bomba de Alimentação da Caldeira

A bomba de alimentação de caldeira eleva a pressão da água proveniente do desaerador de maneira a aumentar a pressão na entrada da turbina (PUC-Rio).

Os sistemas de controle da água de alimentação devem regular o abastecimento de água ao tubulão de evaporação para manter o nível entre limites desejáveis. Esses limites devem ser observados no indicador de nível (ALTAFINI, 2002).

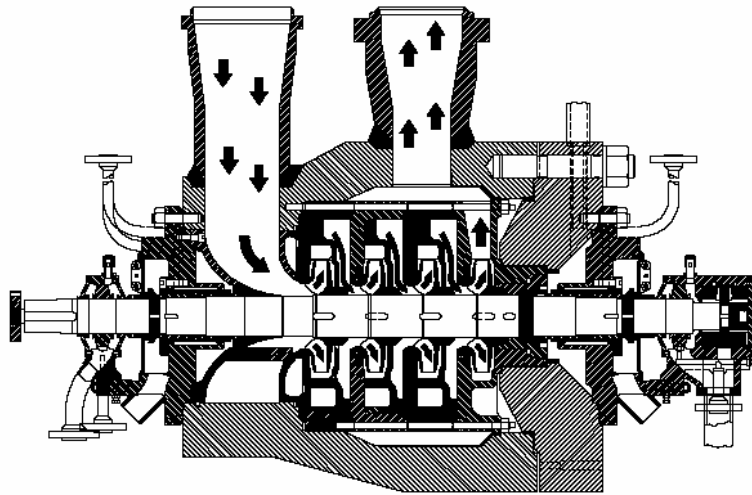


FIGURA 2.14: ESQUEMA EM CORTE DE UMA BOMBA HORIZONTAL MULTIESTÁGIOS. FONTE: PUC-RIO

2.5.2.9 Outros

Para desenvolvimento de uma central termelétrica são necessários diversos sistemas que não foram descritos anteriormente, como por exemplo: estação de tratamento e desmineralização de água, equipamentos de proteção e distribuição de eletricidade e sistemas de controle de geração de energia e industrial.

2.6 Meio Ambiente

A energia termoelétrica proveniente da biomassa reduz e pode até mesmo equilibrar as emissões de carbono quando comparada àquela proveniente de combustíveis fósseis (PARO, 2011).

As principais impurezas dos combustíveis são enxofre e cinzas. No caso do enxofre, a sua periculosidade ocorre pelo dióxido de enxofre SO_2 , produto gerado na combustão, este combinado à água do ambiente forma ácido sulfúrico H_2SO_4 .

Os principais poluentes emitidos na geração termoelétrica são monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). Os óxidos de enxofre (SO_x) podem causar chuvas ácidas. Já o monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x) causam problemas de saúde, principalmente associadas ao sistema respiratório, e podem dar origem ao ozônio, relacionado à doenças como asma e bronquite.

Além da poluição local, a queima de qualquer combustível gera dióxido de carbono (CO_2) e N_2O , isto é, emissões de gases de efeito estufa (GEEs) (CORTEZ, 2011).

Na análise dos impactos ambientais decorrentes da geração de energia, todo o ciclo do combustível deve ser considerado, pois parte dos impactos ambientais estão associados à etapa de produção e transporte do recurso energético (CORTEZ, 2011).

As UTEs alimentadas por biomassa em geral têm a vantagem de apesar de emitirem CO_2 , não contribuírem para o efeito estufa, pois o carbono tem balanço nulo, uma vez que a biomassa ao se desenvolver consome CO_2 na fotossíntese (CORTEZ, 2011). O uso da biomassa tem outro aspecto ambiental favorável já que a emissão de CO_2 da queima da biomassa na atmosfera geralmente é compensada pela absorção no plantio da nova biomassa (INGHAM, 1999 apud QUIRINO et al, 2005). Os principais poluentes de usinas a biomassa são o material particulado MP e os óxidos de nitrogênio NO_x , estas usinas não emitem óxido de enxofre SO_x .

O uso da madeira para produção de energia apresenta menores problemas de poluição quando comparada aos combustíveis fósseis, tendo em vista que esta possui um baixo teor de enxofre (CUNHA et al., 1989 apud Quirino et al, 2005).

Considerando, portanto, o baixo teor de enxofre e o balanço de emissões de CO₂, desde o plantio da biomassa até a utilização em processos térmica, o uso da madeira para fins energéticos é bastante interessante e vantajoso. Para controle da emissão de poluentes, Cortez, Lora e Gomez (2008) citados por Dantas (2010) apresentam dois equipamentos muito usados em sistemas de bagaço de cana: os separadores ciclônicos e os lavadores de gases.

Descrevendo o princípio de operação dos lavadores de gás, Cortez, Lora e Gomez (2008) citados por Dantas (2010) explicam que consistem na separação dos particulados de fluxos de gás por meio de lavagem de água, na forma de película ou spray. Os autores citam experiências que descrevem eficiências superiores a 97%.

Para o NOx há métodos preventivos (como recirculação dos produtos de combustão, combustão por etapas ou queimadores com baixa emissão de NOx e métodos de controle pós combustão, como injeção não catalítica de amônia (CORTEZ, 2011). Um método bastante utilizado para controle de MP são os precipitadores eletrostáticos também conhecidos como filtros de manga.

2.7 Análise Financeira

Para o estudo de viabilidade econômica de uma usina termoeletrica diversas técnicas podem ser utilizadas. As de uso mais frequente são o payback simples, PS, o valor presente líquido, VPL, e a taxa interna de retorno, TIR.

O payback simples indica o tempo decorrido entre o momento do investimento inicial até o momento em que o lucro líquido acumulado se iguala ao valor do investimento, recuperando o capital investido. O PS não considera taxa de juros e inflação e pode ser calculado pela equação 2.9:

$$PS = \sum_{\text{primeiro ano}}^{\text{ultimo ano}} \text{Fluxo de Caixa}_{\text{ano}} = \text{Valor do Investimento Inicial} \quad (2.9)$$

Como vantagem o PS é considerado adequado para avaliação econômica de projetos com vida útil limitada e de alto risco e também é um método que fornece grau de liquidez e risco para o projeto. O valor encontrado para o PS é mais atraente quanto menor o período de recuperação do investimento.

O valor presente líquido é uma fórmula que determina o valor presente de pagamentos futuros descontando uma taxa de juros. Assim, o VPL mede a riqueza gerada por um determinado ativo futuro a valores atuais. Pode ser calculado por:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Fluxo de Caixa}_t}{(1+i)^t} \quad (2.10)$$

Onde n é o período de duração do projeto, i é o custo do capital e t é o tempo que o dinheiro foi investido.

A taxa interna de retorno é a taxa de desconto que aplicada a um fluxo de caixa iguala os valores das despesas aos valores de retorno do investimento, considerando ambos a valores presentes. A TIR representa a rentabilidade do projeto e entre vários projetos o melhor é aquele de maior TIR. A TIR pode ser calculada através de uma função em uma calculadora científica ou em softwares como o Microsoft excel.

2.8 Eficiência Energética

Na correlação entre eficiência e eletricidade, (...), o olhar crítico sobre o setor de geração de energia elétrica, antes que esta seja gerada, transmitida, distribuída e consumida revela possibilidades de ganho importantes (PARO, 2011).

A eficiência de conversão das plantas de combustão de biomassa depende principalmente da quantidade de componentes de combustível não queimado e das perdas térmicas por calor sensível do gás de combustão (tradução nossa, ERNHART, 2011).

A eficiência de um sistema de combustão pode ser calculada através da relação entre energia fornecida pelo combustível ao sistema e energia produzida pelo sistema. Esta relação também é conhecida como consumo específico ou heat rate do sistema global.

A energia fornecida pelo combustível ao sistema pode ser calculada multiplicando a quantidade de combustível queimado pelo seu poder calorífico.

O valor combustível do cavaco depende claramente da sua umidade e pode ser estimada em função desta para cada tipo de madeira (ver figura 2.15). Uma desvantagem do uso de cavaco de madeira é a baixa temperatura de fusão das cinzas (tradução nossa, ERNHART, 2011).

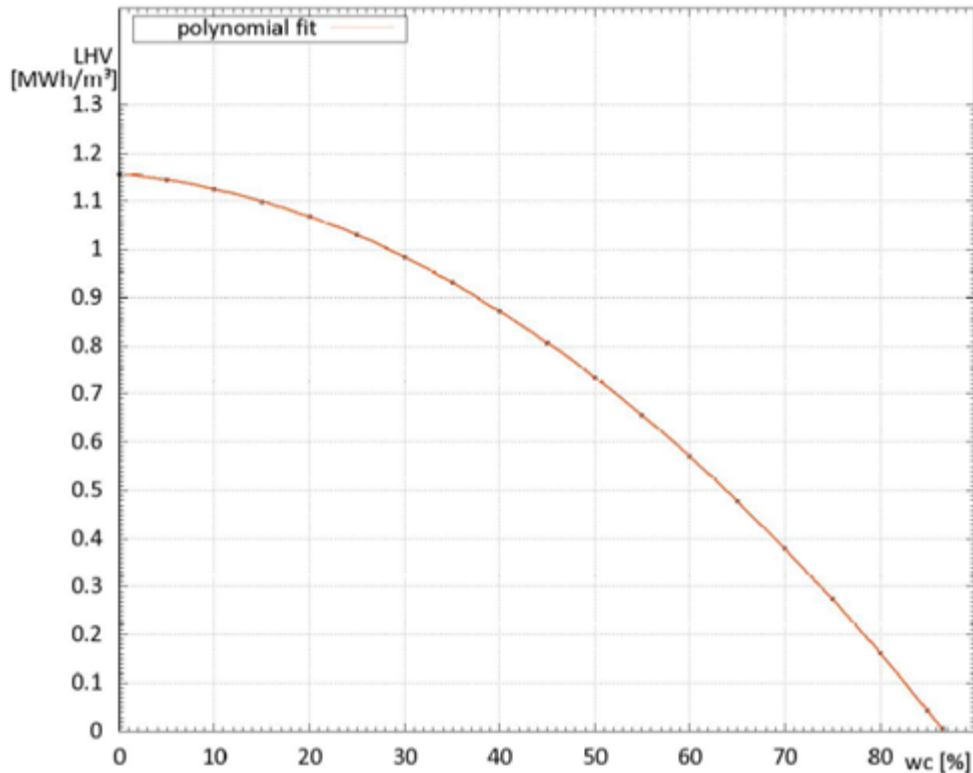


FIGURA 2.15: VALOR CALORÍFICO LÍQUIDO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ÁGUA NO COMBUSTÍVEL. FONTE: ERNHART, 2011

Há muitas formas de se medir a eficiência de sistemas de cogeração, cada uma delas explicada pela finalidade proposta para o sistema e pela precisão a que se pretende chegar (PARO, 2011).

Carnot definiu uma máquina térmica hipotética ideal a qual operando em um ciclo com algumas condições de contorno específicas, atinge o máximo da eficiência térmica possível, respeitando as leis da termodinâmica (PARO, 2011).

Utilizando-se a 2a Lei da Termodinâmica, verifica-se que a máxima eficiência térmica que pode ser obtida neste ciclo é representada pela equação 2.11 abaixo, conforme Horlock (1997) citado por Paro (2011).

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_b} = \frac{T_b - T_a}{T_b} \quad (2.11)$$

Onde:

η_{th} – Eficiência térmica do ciclo;

W – Trabalho gerado;

Q_b – Calor da alta temperatura;

T_b – Temperatura do reservatório de alta temperatura;

T_a – Temperatura do reservatório de baixa temperatura.

Atualmente, grande parte dos processos industriais trabalha com um nível de temperatura muito elevado, durante a queima de combustíveis. Metade desse calor produzido é perdida, podendo tanto ir para a atmosfera quanto para condensadores (MARTINS, 2006).

Muitos processos industriais produtores de vapor não utilizam esse produto para produção de energia elétrica desperdiçando essa capacidade da planta.

O uso racional desse calor gerado aumenta o rendimento do processo, pois diminui as perdas de energia útil, além de emitir quantidade menor de poluentes para a atmosfera (MARTINS, 2006).

Certos sistemas podem ser utilizados como forma de recuperação de energia e assim contribuir para a melhora da eficiência global de uma planta. Como por exemplo em sistemas de secagem ou pré-aquecimento de ar de combustão, onde o calor exausto é utilizado em um processo que consome calor, e também em sistemas de aquecimento de água que utilizam trocador de calor para elevar a temperatura deste fluido.

2.9 Alternativas ao Sistema de Condensação

Existem duas possibilidades de sistemas de condensação, os de condensação a ar e os de condensação à água. Diversos fatores influenciam a seleção de um destes sistema, como por exemplo a disponibilidade de água, o espaço para a instalação, a qualidade da água e do ar, o clima e o custo do investimento.

Em regiões onde a temperatura de bulbo seco, que é a temperatura mais baixa que pode ser alcançada, apenas pela evaporação da água, é amena, os sistemas a ar são mais atrativos. Entretanto estes mesmos sistemas apresentam maior custo de manutenção devido à desgastes e vazamento do fluido refrigerante.

Os condensadores a água são melhores quando consideramos a eficiência energética e são mais recomendados para instalações de grande porte, mas é necessário analisar os custos de investimento e operacionais para que estes se tornem viáveis.

Os custos operacionais e de manutenção para os sistemas de condensação são: consumo de água e energia, custo da manutenção, custo do tratamento da água e limpeza do sistema de condensação.

De acordo com fabricantes, em instalações de até cerca de 2000kW o condensador a ar apresenta melhor custo. Acima desta potência os sistemas de condensação que utilizam água se tornam melhor investimento.

Quando a opção é feita pelos sistema de condensação à água, devem ser considerados, o volume necessário de reposição, que nas torres de resfriamento pode ser um valor significativo e o estudo de viabilidade técnica para uso de águas de chuva e reuso.

A decisão de instalação para a recuperação de calor é tomada com base na análise do investimento inicial e do retorno esperado com a venda da energia. Geralmente, a partir de sistemas de médio porte esta viabilidade é alcançada (LIMA, 1994 apud CORTEZ, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a análise de viabilidade térmica e econômica de uma central termoelétrica com queima de cavaco de madeira e gás natural foram estabelecidas algumas premissas de forma a delimitar o escopo e garantir um estudo mais focado no ciclo termodinâmico e seu correto dimensionamento:

- Não existe a necessidade de vapor para processo, portanto a produção total do vapor deve ser utilizada para a geração de energia elétrica e toda a potência térmica dissipada na saída da turbina será condensada e retornará ao ciclo;
- É necessário garantir o fornecimento de 20MW de energia elétrica nos terminais do gerador para a posterior venda desta energia no mercado livre;
- Há disponibilidade suficiente de cavaco de madeira para o consumo da planta e sua qualidade será garantida, não são abordados neste estudo a produção e colheita do cavaco, este insumo será comprado na região;
- A planta está localizada próxima a um gasoduto e tem suprimento garantido e suficiente de gás natural;
- A princípio o gás natural é utilizado apenas como complementação em épocas de menor oferta da biomassa, mas será estudada a proporção ótima de queima dos combustíveis;
- Ocorre pré-aquecimento da biomassa para o abastecimento da caldeira;
- Ponderar que a caldeira utilizada no processo é dual fuel para queima de cavaco de madeira ou gás natural em qualquer proporção;
- A planta está localizada junto a um rio, represa, ou possui poço artesiano (com boa vazão), e tem, portanto, fornecimento garantido e suficiente de volume de água para o seu processo, esta água deve receber tratamento adequado antes de retornar ao rio, após fazer parte do processo de resfriamento, conforme indicado pelos órgãos reguladores competentes.

3.1 Configuração do Ciclo a Vapor

Para determinar a configuração e disposição dos equipamentos na central termoeletrica a ser estudada considerou-se o esquema típico para uma planta a vapor, conforme pode ser visto na figura 2.2 e na figura 2.6. O modelo para este trabalho não considera entretanto o uso de aquecedores, que são opcionais ao projeto.

Assim, incluindo todos os equipamentos a serem instalados, exceto pela bombas de condensado e de alimentação da caldeira que não estão representadas na figura, a configuração adotada para a central termoeletrica que será objeto deste estudo é apresentada na figura 3.1 abaixo.

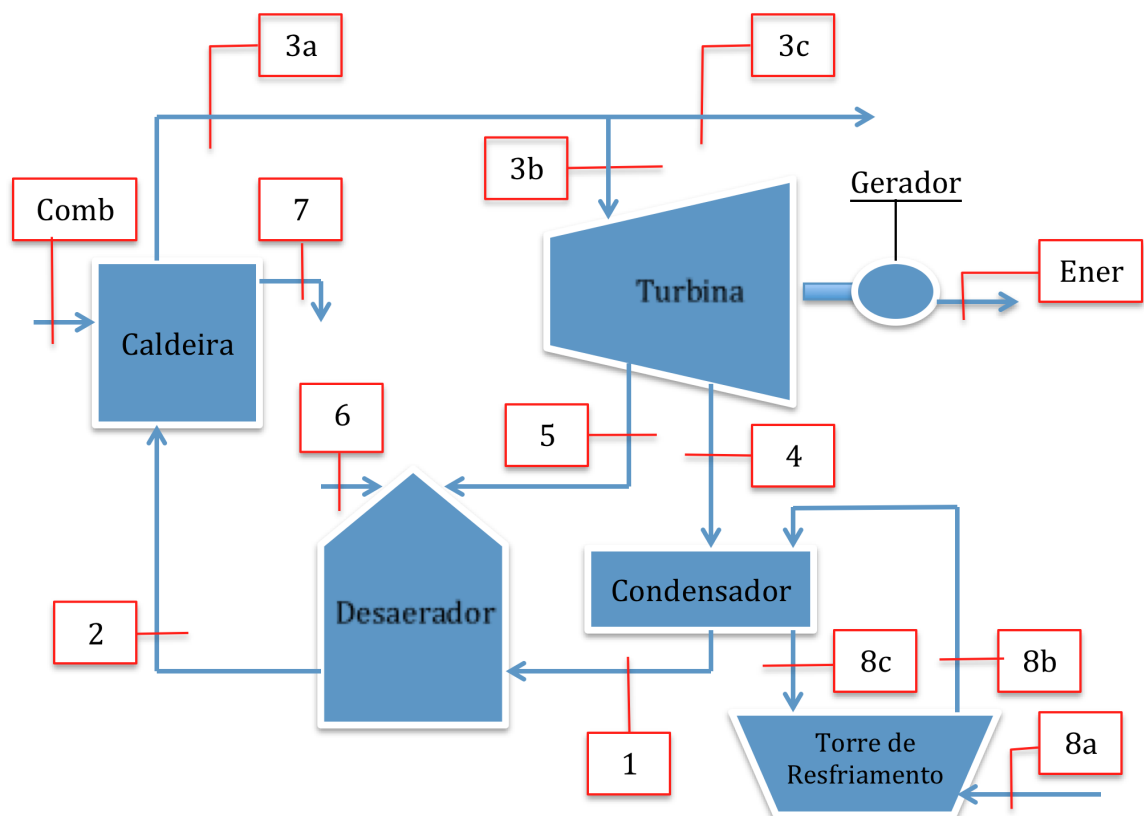


FIGURA 3.1: CICLO A VAPOR (RANKINE) PARA QUEIMA DE CAVACO DE MADEIRA E GÁS NATURAL. FONTE: DESENVOLVIMENTO PRÓPRIO.

Os pontos indicados em vermelho na figura 3.1 podem ser descritos como:

- 1) Saída de água do condensador e entrada no desaerador.
- 2) Saída do desaerador e entrada da caldeira / água de alimentação.
- 3) Saída da caldeira e entrada da turbina.

Os pontos 3a, 3b e 3c apresentam o mesmo valor de estado e entalpia mas apresentam diferentes valores para vazão mássica.

O ponto 3c representa vapor para o ejetor da turbina.

4) Saída de vapor da turbina e entrada no condensador.

5) Extração de vapor da turbina e entrada no desaerador.

6) Make-up do desaerador.

7) Dreno de fundo da caldeira.

8) Sistemas da Torre de resfriamento para troca térmica com o Condensador.

Comb) Alimentação de Combustível na Caldeira: cavaco de madeira e gás natural.

Ener) Energia gerada na turbina e potencia elétrica nos terminais do gerador.

3.1.1 Modelo para determinar as entalpias e estados do ciclo

Para determinar o consumo de combustível na planta e definir as especificações e dados dos equipamentos que compõem o ciclo é necessário fazer o balanço de energias, de modo a encontrar o valor das entalpias e dos estados da água em cada ponto do sistema, conforme pode ser visto na figura 3.1, e em seguida realizar o balanço de massas para os mesmos pontos.

Com a intenção de realizar os balanços de energia e massa foi projetado, utilizando o software Microsoft Excel, um modelo do ciclo térmico em estudo (conforme figura 3.1). Esse modelo é apresentado no apêndice A.

Através das premissas estabelecidas percebe-se que o primeiro equipamento que deve ser dimensionado neste sistema é o conjunto gerador-caldeira.

Este conjunto deve garantir a demanda de 20MW para venda no mercado livre e além disso também deve suprir a necessidade de consumo interno da planta. O consumo interno de uma instalação deste porte corresponde a cerca de 5% do valor gerado, conforme analisado em outros projetos similares. Assim, o consumo interno desta planta é 1MW. Logo, o conjunto gerador-turbina deve ter capacidade e operar produzindo cerca de 21MW nos terminais do gerador.

A turbina selecionada deve ser do tipo condensação, pois, conforme informado no item 2.5.2.3, são frequentemente utilizadas em centrais termelétricas pois não há necessidade de vapor de baixa ou média pressão para processo.

A partir desta especificação técnica da turbina é possível, através da folha de dados fornecida pelo fabricante, coletar informações sobre temperatura e pressão do vapor na entrada da turbina, pressão de eventuais extrações e pressão do vapor exausto. Em posse desses dados determina-se a entalpia, interpolando valores da tabela de propriedades termodinâmica da água, apêndice B, e o estado do vapor na entrada da turbina.

No ponto 4, saída da turbina, não deve existir água no estado líquido pois afetaria a vida útil do equipamento. Considerando então vapor saturado e conhecendo o valor da pressão de exaustão, determina-se a entalpia para o ponto 4, quando a água deve estar levemente mais aquecida que vapor saturado.

Ao passar pelo condensador o processo é isobárico, a pressão do ponto 4 será a mesma pressão do ponto 1. Todo o vapor saturado ao passar pelo condensador se torna líquido saturado e é possível determinar o estado no ponto 1.

Para determinar o estado do ponto 5 é necessário especificar as características do desaerador. A pressão de operação do desaerador deve atender a pressão de extração da turbina e a temperatura fornecida para a água de alimentação da caldeira deve ser a maior possível, pois quanto maior essa temperatura melhor será a eficiência da caldeira, funcionando como um pré-aquecimento da água de alimentação.

Com os dados do desaerador e considerando novamente que a extração da turbina deve ser vapor saturado, para preservar a vida útil do equipamento, determina-se a entalpia no ponto 5.

O estado no ponto 6, que equivale ao make-up do desaerador, pode ser determinado pois a água de make-up encontra-se a temperatura ambiente 25 °C e pressão ambiente.

$h_6 = 25 \text{ kcal/kg}$, líquido comprimido.

A entalpia no ponto 2, entrada de água de alimentação da caldeira, pode ser estabelecida utilizando temperatura de saída da água informada na folha de dados do desaerador e considerando água líquida saturada.

As características necessárias para especificação da caldeira dual-fuel a ser utilizada no processo são pressão de operação e vazão de vapor. A pressão de

operação da caldeira é estabelecida após a seleção da turbina, pois devem ser respeitadas as condições de operação da turbina, a troca de calor na caldeira é realizada a pressão constante (isobárica).

A eficiência da caldeira pode ser estimada em 82%, conforme descrito no item 2.5.2.2.

Para a caldeira deve ser considerado um dreno de fundo, ponto 7 da figura 3.1, responsável pela captação de água de drenagem para eliminar os sólidos e impurezas ainda presentes na água mesmo após tratamento de desmineralização. No dreno a pressão é a mesma de operação da caldeira e a temperatura é a de saturação considerando que a água é líquido saturado, determina-se entalpia em 7.

Com os valores de pressão e entalpia obtidos das folhas de dados de equipamentos ou calculados das tabelas de propriedades termodinâmicas da água, conseguimos obter o balanço de energia para o nosso modelo de central termoelétrica. Esses valores, após calculados, devem ser informados ao modelo projetado no Excel, e fazem parte dos dados fixos do modelo, valores que não podem ser alterados na planilha pois correspondem ao dimensionamento e condições de operação dos equipamentos.

3.1.2 Modelo para determinar as vazões mássicas e potencia do ciclo

Em seguida é necessário realizar o balanço de massas, isto determinará a vazão de vapor da caldeira, que é um dado necessário para a especificação deste equipamento e também permitirá o estudo sobre a proporção de alimentação do combustível na caldeira.

Para calcular a vazão de vapor na saída da caldeira é necessário considerar que este valor terá influência sobre a potência elétrica entregue pela turbina. Todo o vapor entregue será turbinado, quanto mais vapor produzido pela caldeira mais energia elétrica será produzida na turbina. A produção de 21MW necessita de um valor exato de vazão de vapor produzido na caldeira.

Como adotado neste estudo, a potência que a usina deve entregar à rede é 20MW, entretanto não deve ser esquecido o consumo próprio da planta que é cerca

de 5% do valor de demanda da rede, ou seja 1MW. Portanto a potência a ser produzida pela planta, P_{turb} , deve ter um valor aproximado de 21MW.

O valor de vazão de vapor na saída da caldeira depende, entre outros, do PCI e da vazão mássica de entrada dos combustíveis entregue à caldeira.

Conforme discutido na revisão bibliográfica podem ser encontrados diversos valores de PCI para biomassa de cavaco de madeira e em alguns casos para o gás natural. Esses valores variam em função da composição química e umidade dos combustíveis. Para os cálculos deste trabalho foram utilizados os valores do PCI informados pelos vendedores do combustível. Logo, o PCI do gás natural utilizado é 9.400 kcal/kg conforme indicado pela Comgás e o PCI do cavaco florestal de eucalipto foi fixado em 2.800 kcal/kg.

As equações para cálculo das vazões mássicas de vapor ao longo do ciclo da figura 3.1, baseadas nas leis da termodinâmica e conforme as equações 2.3 até 2.8, estão descritas a seguir:

$$\dot{m}_{3A} = \frac{(\dot{m}_{cavaco} * PCI_{cavaco} * \eta_c + \dot{m}_{gás\ natural} * PCI_{gás\ natural} * \eta_c)}{((h_3 - h_2) + 0,015 * (h_7 - h_2)) / 1000} \quad (3.1)$$

$$P_{turb} = \frac{(\dot{m}_{3B} * h_3 - \dot{m}_5 * h_5 - \dot{m}_4 * h_4) * \eta_T}{860} * 1000 \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_{3B} = \dot{m}_{3A} - \dot{m}_{3C} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_{3C} = \dot{m}_{3A} * 0,01 \quad (3.4)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{3B} - \dot{m}_5 \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_7 = 0,015 * \dot{m}_{3A} \quad (3.6)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{3A} + \dot{m}_7 \quad (3.7)$$

$$\dot{m}_2 * h_2 = \dot{m}_6 * h_6 + \dot{m}_5 * h_5 + \dot{m}_4 * h_1 \quad (3.8)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_2 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5 \quad (3.9)$$

Onde:

h_1 : entalpia na saída do condensador para desaerador (kcal/kg)

h_2 : entalpia na entrada da caldeira / água de alimentação (kcal/kg)

h_3 : entalpia na saída da caldeira / entrada da turbina (kcal/kg)

h_4 : entalpia na entrada do condensador (kcal/kg)

h_5 : entalpia na entrada do desaerador (kcal/kg)

h_7 : entalpia no dreno da caldeira (kcal/kg)

h_6 : entalpia na água de reposição do desaerador (kcal/kg)

η_C : eficiência da caldeira (%)

η_T : eficiência da turbina (%)

PCI_{cavaco} : poder calorífico inferior do cavaco de madeira (kcal/kg)

$PCI_{gás\ natural}$: poder calorífico inferior do gás natural (kcal/kg)

P_{turb} : potência da turbina (kW)

$\dot{m}_{cavaco}$: vazão mássica de cavaco de madeira na entrada da caldeira (kg/h)

$\dot{m}_{gás\ natural}$: vazão mássica de gás natural na entrada da caldeira (kg/h)

$\dot{m}_2$: vazão mássica da água de alimentação da caldeira (ton/h)

$\dot{m}_{3A}$: vazão mássica de vapor na saída da caldeira (ton/h)

$\dot{m}_{3B}$: vazão mássica de vapor na entrada da turbina (ton/h)

$\dot{m}_{3C}$: vazão mássica de vapor para os ejetores da turbina (ton/h)

$\dot{m}_4$: vazão mássica de vapor na entrada ou saída do condensador (ton/h)

$\dot{m}_5$: vazão mássica de vapor na entrada do desaerador (ton/h)

$\dot{m}_6$: vazão mássica da água de reposição do desaerador (ton/h)

$\dot{m}_7$: vazão mássica no dreno da caldeira (ton/h)

Considerando as nove equações acima, nota-se que a maior parte das incógnitas são conhecidas ou foram calculadas durante a realização do balanço anterior. As incógnitas que ainda apresentam seus valores desconhecidos são apenas as vazões mássicas.

É possível determinar os valores das incógnitas de vazão mássica utilizando o sistema de nove equações acima.

Um dos métodos para solução de um sistema de nove equações e dez incógnitas é estipular um valor para duas das incógnitas e a partir desses valores resolver o sistema para as oito incógnitas restantes.

Para a solução destas nove equações foi utilizado o modelo de sistema iterativo do software Excel, apresentado no apêndice A, em que é possível atribuir valores às vazões mássicas de entrada dos combustíveis, cavaco de madeira e gás natural, de forma a obter os resultados para vazão mássica em cada ponto do ciclo. Assim como o valor de energia que será gerada pela turbina. O sistema também considera o balanço de energia no desaerador, a energia que é entregue ao desaerador deve ser igual energia que deixa o desaerador na água de alimentação da caldeira, ver eq.3.8.

Neste sistema, após atribuir os valores e encontrar as soluções das vazões mássicas do ciclo, deve ser analisado o valor resultante para a energia produzida na saída do gerador. É necessário avaliar que o valor encontrado para esta variável deve estar em torno de 21MW, caso não seja verdade os dados de entrada devem ser considerados inválidos.

Logo, devem ser realizados alguns testes estipulando valores para as massas de combustíveis de forma a garantir a produção de 21MW e assim verificar qual é a massa de vapor calculada, pelo modelo do excel, na saída da caldeira. Assim, está estabelecido mais um parâmetro de dimensionamento da caldeira.

Finalmente, todos os valores e parâmetros para funcionamento da central termoeletrica estão definidos. Qualquer valor para vazão mássica dos combustíveis introduzido no modelo do excel retornará as vazões ao longo do sistema. Para determinar a proporção ótima de queima dos combustíveis para esta planta é necessário realizar a análise econômica e verificar os custos envolvidos.

3.2 Elaboração da Análise de Viabilidade Econômica

Inicialmente é possível determinar os valores de investimento para a construção da central termoeletrica. Esse investimento envolve basicamente os custos com equipamentos e construção. Este trabalho considera que o investidor já

possui as licenças, o terreno e o projeto de engenharia. Por este motivo a análise econômica não considera estes custos como investimento.

Os custos com equipamentos e instalação, que compõem o valor do investimento total para a termoeletrica, foram informados por fabricantes ou fornecedores. Esses valores foram obtidos após o dimensionamento do sistema, quando todos os dados da especificação técnica são conhecidos, conforme os cálculos expostos no item 4, resultados. A tabela 3.1 a seguir apresenta os valores obtidos para cada equipamento.

Logo, o custo total para o investimento da central termoeletrica é R\$ 69.500.000,00, o que representa um investimento de R\$ 3.450,00/kWh. Considerando que a média de investimento para plantas deste porte é de 3.000,00 a 3.500,00 R\$/kWh, conforme analisado para outros projetos semelhantes, o valor encontrado é bastante aceitável.

Tabela 3.1: Preços para equipamentos e obra civil. Fonte: Desenvolvimento próprio a partir de dados de fabricantes.

EQUIPAMENTO / CONSTRUÇÃO	PREÇO (R\$)
Turbina a vapor condensação 20MW + Condensador	10.000.000,00
Gerador	8.000.000,00
Caldeira cavaco de madeira e gás natural, 100bar, 110tonv/h + Des aerador + Bomba de Alimentação	30.000.000,00
BOP	8.000.000,00
Torre de Resfriamento	1.500.000,00
Obra Civil	12.000.000,00

Os custos operacionais relativos a esta planta são os custos de manutenção dos equipamento, compra dos combustíveis, gás natural e cavaco de madeira, e os custos com o tratamento para obter agua desmineralizada para make-up do desaerador.

Os custos com manutenção para centrais termoeletricas em geral, determinados por fabricantes, é cerca de U\$ 0,01 /kWh ou adotando a conversão do dólar média para o mês de outubro de 2012, R\$ 0,02 /kWh. Logo, considerando o período de 1 ano, os gastos com manutenção serão:

$$Manutenção = \frac{R\$ 0,02}{kWh} * 20.000 kW * \frac{8640h}{ano} = \frac{R\$ 3.456.000,00}{ano} \quad (3.10)$$

Os custos com cavaco de madeira foram determinados pelos vendedores da biomassa, e como já discutido no item 2.4.1 o valor encontrado para esta biomassa foi de R\$ 100,00/ton.

Os custos com gás natural dependem do valor determinado pela concessionária, no caso estudado para o estado de São Paulo esta concessionária é a Comgás. As tarifas estabelecidas estão descritas na Deliberação ARSESP No 283, de 08-12-2011, deve ser considerado o segmento termoeletricas e dentro deste segmento deve ser utilizada a tarifa para geração de energia destinada a próprio consumo ou consumidor final (mercado livre de energia). Assim, o preço de aquisição deve ser composto pela tarifa fixa e a tarifa variável. A tarifa de custo fixo (sobre transporte e canalização) é R\$ 0,699311 /m³ e a tarifa de custo variável é R\$ 0,037432 /m³. Como o valor de consumo de GN é dado de entrada para o modelo do excel e é digitado em kg/h, para calcular o custo é necessária a densidade do GN, que é 0,76kg/m³ a 20°C e 1atm.

Os custos para o combustível vão variar conforme a proporção estabelecida na queima da caldeira. E é a melhor viabilidade econômica que vai indicar as melhores proporções de queima para esta central termoeletrica, pois o ponto ótimo não altera produção de energia elétrica ou vapor, apenas altera os custos e consequentemente o valor de custo do kWh produzido.

O custo do consumo da água desmineralizada, conforme informado por fabricantes de plantas de desmineralização é aproximadamente U\$ 1,00/m³, ou R\$ 2,00/m³. O valor de consumo de água desmineralizada na planta, que é o valor de vazão mássica do make-up do desaerador, é estabelecido no balanço de massas calculado no item 4.

As receitas de uma central termoeletrica são decorrentes da venda de energia produzida pela planta. Neste caso a planta vende 20MW ao mercado livre de energia. De acordo com informações recentes o valor da energia no mercado livre era de R\$ 300,00/MWh, o que equivale a uma receita anual de cerca de:

$$Venda\ Energia\ Elétrica = \frac{R\$300,00}{MWh} * 20\ MW * \frac{8640h}{ano} = \frac{R\$ 51.840.000,00}{ano} \quad (3.11)$$

3.2.1 Métodos de Análise de Viabilidade (PS, VPL, PD e TIR)

No modelo proposto através do software Excel para o cálculo dos balanços técnicos da central termoeleétrica, também são calculados os custos, investimentos e receitas, além da análise de viabilidade utilizando o métodos de PS, VPL, PD e TIR.

Para determinar o fluxo de caixa foram realizadas os seguintes passos, acompanhar pelo apêndice A:

Para a análise do investimento foi considerado um período de 20 anos pois é um período típico para empreendimentos desta natureza.

O tempo em que ocorre o investimento pode ser 100% realizado no primeiro ano ou dividido em 2 anos ou mais, esse valor pode ser alterado na planilha, de forma iterativa, conforme interesse do investidor. Entretanto para a análise será considerado a princípio que o investimento ocorre em 1 ano e já existem receitas no ano seguinte.

O valor do investimento foi calculado a partir da tabela 3.1 e é um valor fixo que é realizado no primeiro ano do projeto.

Através do modelo proposto no excel, existe a possibilidade de avaliar os efeitos de diferentes porcentagens para financiar o valor de investimento da planta. Assim, o valor de financiamento equivale à porcentagem adotada em relação ao investimento inicial, dividido pelo período em que ocorrerá investimento, para o caso adotado, ano 1. Os valores de praxe para investimentos semelhantes através do BNDES estão em torno de 60%.

A receita começa no ano 2 e vai até o ano 20 com valor calculado na equação 3.11 com o valor da venda de energia elétrica.

O valor dos custos operacionais totais pode variar pois, a única parcela fixa dos custos é o custo de manutenção, calculado na equação 3.10, o consumo das águas é um valor que varia muito pouco e os custos dos combustíveis são valores variáveis. Os valores variáveis dependem da proporção de queima de combustível. Entretanto, quando determinada a proporção de queima, os custos operacionais são os mesmo do ano 2 ao ano 20.

As despesas operacionais e financeiras equivalem a 1,0% por ano sobre o valor do investimento inicial, ou seja, é um valor constante dos anos 2 ao 20.

Os juros de financiamento para cada ano correspondem à taxa de juros adotada, que é um valor de entrada da tabela do excel, multiplicada pelo resultado do valor inicial financiado retiradas as parcelas que já foram amortizadas da dívida. O tempo de amortização da dívida de financiamento também pode ser determinada no modelo do excel. Para empreendimentos semelhantes ao deste estudo existem financiamentos do BNDES que correspondem a juros de 3,5%.

O Lucro antes do Imposto de Renda, LAIR, ou EBITDA, equivale à soma do investimento, receita bruta, imposto sobre receita, custo operacional e despesas financeiras operacionais.

O Imposto de renda, IR, mais a contribuição social sobre o lucro, CSSL, equivale a 34% sobre o LAIR/EBITDA.

O lucro líquido é o valor do LAIR/EBITDA subtraindo o imposto de renda mais CSSL.

A amortização corresponde ao valor financiado dividido em partes iguais ao longo do tempo de amortização determinado.

Finalmente os fluxos de caixa dos 20 anos podem ser encontrados subtraindo do valor de lucro líquido para cada ano do projeto os juros e a amortização correspondentes.

Com os valores do fluxo de caixa obtidos, o PS é calculado através da equação 2.9 e o VPL através da equação 2.10, a taxa de desconto considerada para o VPL é 12% conforme valor usual fornecido por bancos.

A TIR foi calculada a partir de determinada função do excel, conforme discutido no item 2.7.

Assim, a análise de viabilidade será baseada nos métodos descritos acima. Quanto menor o valor de PS, menor o valor de PD, maior o valor do VPL e maior o valor da TIR, melhor será o retorno financeiro do investimento.

4 RESULTADOS

Para os resultados da análise técnica, apresentados a seguir, foi considerado o esquema básico retratado pela figura 3.1. A instalação envolve o aproveitamento energético do cavaco de madeira e utiliza queima suplementar com gás natural para alimentar o ciclo a vapor (ciclo de Rankine) que é constituído por caldeira, turbina, condensador com torre de resfriamento e desaerador.

4.1 Análise Técnica – Memória de cálculo

4.1.1 Determinando as entalpias e estados do ciclo

Os cálculos para obter dados de entrada e saída, como pressão, entalpia e estado da água, dos equipamentos ao longo do ciclo serão apresentados a seguir, conforme método descrito no item 3.1.

Como o valor de energia elétrica fornecida pela planta deve ser 21MW e não será utilizado vapor para processo, foi selecionada uma turbina de condensação conveniente, conforme especificado no item 3.1.

Tabela 4.1: Dados da turbina a vapor por condensação selecionada para estudo. Fonte: Desenvolvimento próprio a partir de catálogo de fabricante (Siemens).

TURBINA A VAPOR SST-150 - Siemens	
Potência elétrica gerada pela turbina	20 MW
Pressão de entrada	103 bar
Temperatura de entrada do vapor	505 °C
Extração controlada até	16 bar
Pressão de saída de vapor (para turbina de condensação)	0,25 bar
Eficiência (com gerador)	94%

A partir dos dados da tabela 4.1 pode ser determinado o estado do ponto 3, indicado na figura 3.1, que corresponde aos dados de processo imediatamente antes da entrada na turbina.

$$p_3 = 103 \text{ bar} = 10300 \text{ kPa}$$

$$t_3 = 505 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Através da interpolação dos dados das tabelas de propriedades termodinâmicas da água, apêndice B, determina-se que:

$$h_3 = 3382,57 \text{ kJ/kg} = 809,23 \text{ kcal/kg}, \text{ vapor d'água superaquecido}$$

Na saída da turbina para o condensador, equivalente ao ponto 4, a pressão é obtida a partir da tabela 4.1:

$$p_4 = 0,25 \text{ bar} = 25 \text{ kPa}$$

Na saída da turbina não deve existir água no estado líquido pois afetaria a vida útil do equipamento. Assim, é possível determinar o estado no ponto 4:

$$h_4 = 2618,2 \text{ kJ/kg} = 626,4 \text{ kcal/kg}, \text{ vapor saturado}$$

Ao sair do estado em 4 e passar pelo condensador o processo é isobárico, logo, $p_4 = p_1 = 25 \text{ kPa}$. O vapor saturado ao passar pelo condensador se torna líquido saturado e é possível determinar o estado no ponto 1:

$$h_1 = 271,9 \text{ kJ/kg} = 65,05 \text{ kcal/kg}, \text{ líquido saturado}$$

Também é possível determinar o estado da água no ponto 5, que equivale a extração de vapor da turbina para o desaerador.

Tabela 4.2: Dados do desaerador. Fonte: Desenvolvimento próprio a partir de catálogo de fabricante (Steammaster).

DESAERADOR TERMOMASTER - Steammaster	
Pressão de Trabalho	1,3 – 1,5 kg/cm ²
Temperatura de Trabalho	106,6 - 110,8 °C
Mantém a água de alimentação da caldeira acima de 100 °C	

A partir da tabela 4.2 pode ser determinado o estado do ponto 5.

$$p_5 = 1,5 \text{ bar} = 150 \text{ kPa}$$

$$h_5 = 2693,5 \text{ kJ/kg} = 644,4 \text{ kcal/kg}, \text{ vapor saturado}$$

O estado no ponto 6, que equivale ao make-up do desaerador, pode ser determinado pois a água de make-up encontra-se a temperatura ambiente 25 °C e pressão ambiente.

$h_6 = 25 \text{ kcal/kg}$, líquido comprimido

Conforme a tabela 4.2 a água deixa o desaerador com cerca de 105°C , como água líquida saturada, a entalpia no ponto 2 é:

$h_2 = 440,13 \text{ kJ/kg} = 105,3 \text{ kcal/kg}$, líquido saturado

A pressão de operação da caldeira foi estabelecida em $p_3 = 10300 \text{ kPa}$, devido às condições de operação da turbina selecionada, a troca de calor na caldeira é realizada a pressão constante (isobárica).

Para o dreno de fundo da caldeira, ponto 7 da figura 3.1, a pressão é a mesma de operação da caldeira, $p_7 = p_3 = 10300 \text{ kPa}$, e a temperatura é a de saturação considerando que a água é líquido saturado.

$h_7 = 1420,28 \text{ kJ/kg} = 339,5 \text{ kcal/kg}$, líquido saturado.

As entalpias e estados encontrados estão apresentados de forma resumida na tabela 4.3 abaixo:

Tabela 4.3: Resumo de entalpias e estados da água para ciclo de vapor figura 3.1. Fonte: Desenvolvimento próprio.

Pontos do Ciclo	Pressão (kPa)	Entalpia (kcal/kg)	Estado da água
1	25	65,05	Líquido Saturado
2	10300	105,3	Líquido Saturado
3	10300	809,23	Vapor d'água Superaquecido
4	25	626,4	Vapor Saturado
5	150	644,4	Vapor Saturado
6	-	25	Líquido Comprimido
7	10300	339,5	Líquido Saturado

4.1.2 Determinando vazões mássicas e potencia do ciclo

Utilizando o modelo do ciclo iterativo no excel, que corresponde ao modelo apresentado no item métodos deste trabalho, foram realizados alguns testes, estipulando valores para duas variáveis de vazão mássica, a do GN e a do cavaco de forma a obter todas as outras variáveis mássicas do ciclo, assim como a potencia gerada pela turbina.

Através destes testes nota-se que a massa de vapor na saída da caldeira necessária para a produção de 21MW é cerca de 110tonv/h. Assim, está estabelecido mais um parâmetro de dimensionamento da caldeira. A tabela 4.4 a seguir apresenta algumas soluções encontradas pelo sistema montado no software excel.

Tabela 4.4: Valores de vazão mássica dos combustíveis utilizados na simulação e resultados encontrados para a vazão mássica de vapor produzido pela caldeira e energia produzida pela turbina.
Fonte: Desenvolvimento próprio a partir de simulações no sistema montado no software Excel (ver apêndice A).

Situação	$\dot{m}_{cavaco}$ (kg/h)	$\dot{m}_{cavaco}$ (%)	$\dot{m}_{gás\ natural}$ (kg/h)	$\dot{m}_{gás\ natural}$ (%)	$\dot{m}_{3A}$ (t/h)	P_{turb} (kW)
A	33.000	100	0	0	107,1	21.029
B	28.100	95	1.450	5	107,0	21.008
C	23.900	90	2.700	10	106,9	21.006
D	20.700	85	3.650	15	106,9	20.999
E	17.900	80	4.500	20	107,1	21.033
F	13.850	70	5.700	30	107,0	21.020
G	7.570	50	7.570	50	107,0	21.018
H	0	0	9.820	100	106,9	21.008

Logo, conclui-se que a caldeira deve queimar cavaco de madeira e gás natural em uma determinada proporção de forma a produzir cerca de 110tonv/h de vapor para que a energia elétrica gerada na turbina seja aproximadamente 21MW e assim garanta o consumo interno da planta, cerca de 1MW, e a demanda do mercado livre de 20MW.

4.2 Análise Econômica

Utilizando as situações de A e B da tabela 4.4, foram feitas as simulações para avaliar os dados econômicos fornecidos pelo modelo do excel, que foi idealizado a partir do item métodos deste trabalho. Os dados obtidos estão apresentados na tabela 4.5 a seguir. Para o fluxo de caixa gerado a partir do modelo ver apêndice A.

Para a tabela 4.5 considerar que para qualquer situação, de A e B, o valor do investimento=R\$ 69.500.000,00, da manutenção=R\$ 3.456.000,00 e da venda de energia=R\$ 51.840.000,00, são sempre os mesmos. E o financiamento é de 0%.

Tabela 4.5: Simulação de duas situações de uso de combustíveis na planta para coleta dos dados de análise econômica. Fonte: Desenvolvimento próprio a partir de simulações no sistema montado no software Excel (ver apêndice A).

Situação	A	B
$\dot{m}_{cavaco}$ (kg/h)	33.000	28.100
(%)	100	95
$\dot{m}_{GN}$ (kg/h)	0	1450
(%)	0	5
Custo Cavaco (R\$/ano)	28.512.000,00	24.278.400,00
Custo GN (R\$/ano)	0	13.601.981,92
Custo Água Desmi (R\$/ano)	46.247,86	46.202,81
Custos Operacionais Totais (R\$/ano)	32.014.247,86	41.382.584,73
Fluxo de Caixa (ano 2 a 20) (R\$/ano)	12.626.296,41	6.443.194,07
VPL (R\$)	23.502.481,93	-22.040.870,18
TIR	17,29%	6,44%

Os valores apresentados na tabela 4.5 indicam que este projeto não é um investimento interessante para a situação B, pois o seu VPL é negativo e a sua TIR é muito baixa, financeiramente é interessante investir em projetos que apresentem uma TIR de pelo menos 12%. Como para os casos B-H, da tabela 4.4, a proporção da mistura tem menor volume de cavaco, que é o combustível mais barato por unidade de massa em relação ao GN, as taxas de análise econômica tendem a

piorar para estes casos. Isto pode ser confirmado nas tabelas de análise econômica geradas pelo modelo do excel apresentadas no apêndice A (para situações A-D).

Assim, os valores da tabela 4.5 e das análises econômicas do apêndice A indicam que a melhor opção para proporção de combustíveis no modelo adotado neste estudo é a situação A, 100% de queima de cavaco de madeira.

5 DISCUSSÃO

A tabela 4.5 indica que o modelo proposto e apresentado como a figura 3.1 não é viável economicamente quando a queima do cavaco é menor do que 95% da massa dos combustíveis queimados, pois a situação B não é interessante e as situações B-H, conforme apêndice A também não são interessantes.

Ou seja, este investimento deve ser reavaliado para que os valores que estejam o inviabilizando possam ser entendidos e solucionados de forma a refletir melhoras econômicas na análise.

A inviabilidade dos casos B-H estudados se deve principalmente ao fato de que não foi considerado financiamento para as estas situações apresentadas. Como o valor do investimento para desenvolver a central é muito grande em todos os projetos em operação analisados para desenvolvimento deste trabalho ocorre financiamento, na maioria dos casos este ocorre pelo BNDES.

O financiamento, conforme informado no item 3.2.1 costuma variar em torno de 60% do valor de investimento, que neste caso corresponde a R\$ 41.700.000,00. E a taxa de juros para projetos de biomassa semelhantes, através de financiamento pelo BNDES, chega até 3,5%.

Para financiamento de 60% com taxa de juros adotada de 3,5%, alguns valores da tabela 4.5 podem ser atualizados, e os dados obtidos estão na tabela 5.1. Tabelas com resultados totais obtidos do modelo excel, estão no apêndice C.

Tabela 5.1: Simulação de duas situações de uso de combustíveis na planta para coleta dos dados de análise econômica, financiamento 60%, taxa de juros 3,5%, tempo amortização 15 anos. Fonte: Desenvolvimento próprio a partir de simulações no sistema montado no software Excel (ver apêndice C).

Situação	A	B
$\dot{m}_{cavaco}$ (kg/h)	33.000	28.100
(%)	100	95
$\dot{m}_{GN}$ (kg/h)	0	1450
(%)	0	5
Fluxo de Caixa (anos 2) (R\$/ano)	8.386.796,41	2.203.694,07
VPL (R\$)	39.628.254,61	-5.915.097,51
TIR	31,18%	8,98%

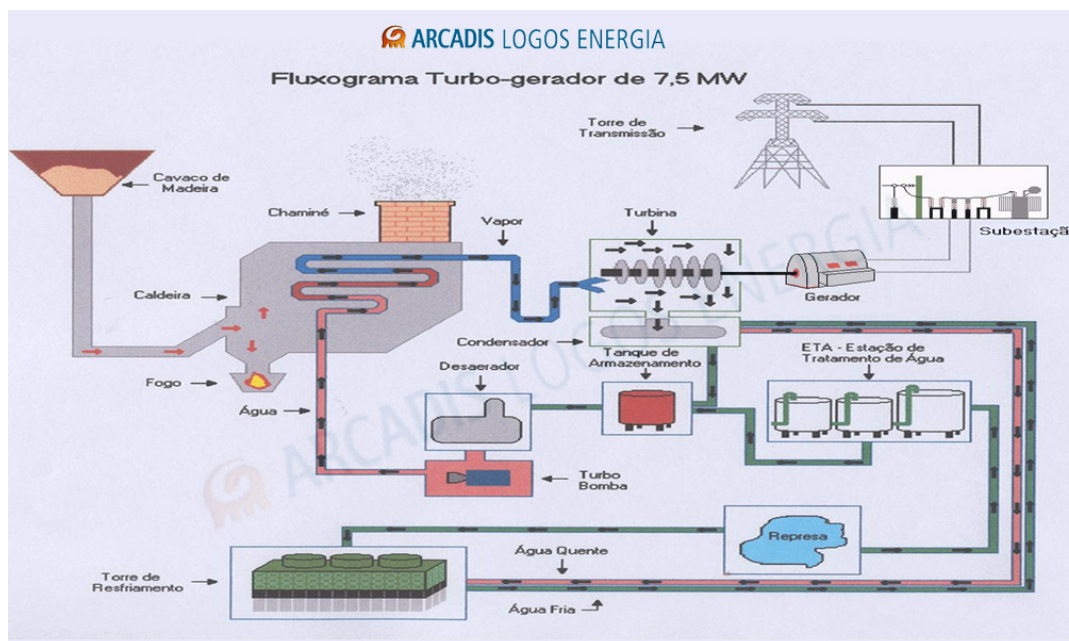


FIGURA 5.1: UTE PIERP – APRESENTA QUEIMA DE CAVACO, PLANTA MUITO SEMELHANTE À DESENVOLVIDA PARA ESTE ESTUDO. FONTE: [HTTP://WWW.LOGOSENERGIA.COM.BR/ALEN/PT/PROJETOS/UTE-PIE-RP/UTE-PIE-RP-FLUXOGRAMA-TURBO-GERADOR-ZOOM.JPG](http://www.logosenergia.com.br/al/en/PT/PROJETOS/UTE-PIE-RP/UTE-PIE-RP-FLUXOGRAMA-TURBO-GERADOR-ZOOM.JPG)

A tabela 5.1 tem melhores dados econômicos para a viabilidade das situações A e B quando comparados com os dados da tabela 4.5. Assim, o financiamento, que ocorre em 100% dos projetos em operação utilizados como referência para este estudo, é essencial para viabilizar a construção deste tipo de centrais, pois os investimentos iniciais, que variam entre 3.000 – 3.500 R\$/ kWh, representam quantias muito grandes de dinheiro a serem recuperadas ao longo dos 15 – 30 anos de operação.

Mesmo com o financiamento proposto, que apresenta condições muito favoráveis, o valor encontrado para o VPL da situação B, apresentado na tabela 5.1 acima, é negativo. Logo, a planta, para ter um VPL positivo e ser viável economicamente, precisa operar a mais de 95% de proporção de queima (em massa) de cavaco de madeira, como já ocorria antes da adoção do financiamento.

Assim, para tentar solucionar a viabilidade para todas as situações, A-H, é interessante verificar os valores adotados ao longo da análise econômico-financeira e tentar encontrar sugestões e possibilidades de modo a viabilizar o projeto com maior proporção para a queima do gás natural.

A exclusão ou redução de um custo operacional significativo pode melhorar os dados de análise de viabilidade.

Uma alternativa possível é reduzir os custos com a compra de combustível.

O custo do gás natural depende de valores tabelados pela concessionária mas, em geral, para empreendimentos como o deste trabalho, são assinados contratos entre a central termelétrica e a concessionária que garantem a demanda e fixam o preço de venda. Os preços praticados nestes contratos costumam ser menores do que os valores tabelados.

Uma das possibilidades para redução do custo do cavaco de madeira é a autoprodução ou produção parcial deste insumo. Outra possibilidade que pode ser adotada é a compra de biomassas menos dispendiosas disponíveis na região de instalação da usina. Entretanto, para a substituição do cavaco por outras biomassas, devem ser analisados os valores de PCI e características destas, além da verificação de compatibilidade de queima deste novo insumo na caldeira empregada.

O valor utilizado neste estudo para compra da biomassa pode variar ao longo dos anos e de acordo com a região, ou seja, o valor adotado pode variar consideravelmente e assim afetar, de forma positiva ou negativa, a viabilidade deste projeto.

Sobre o valor de tratamento de água para desmineralização e para manutenção dos equipamentos, caso seja possível obter valores menores os custos operacionais serão menores. Mas a quantidade de consumo destes insumos não é tão significativo quanto o consumo dos combustíveis. Portanto, o reflexo desta eventual melhora na viabilidade, não será de tanta importância.

Foi adotada para essa planta uma operação em 24 horas por dia durante todos os dias do ano. Este valor é apenas considerável para o estudo, caso a planta seja viabilizada, um futuro estudo deverá apresentar um fator de operação para corrigir a quantidade de horas trabalhadas.

O valor de venda da energia adotado para qualquer estudo de viabilidade de uma central termoelétrica deve ser garantido e firmado em contrato com o consumidor livre (para caso de venda de energia para o mercado livre). O valor poderá variar ao longo dos 20 anos. Esse valor é de extrema importância para a viabilidade da planta e por isso, um contrato com preço de venda deve ser realizado ou adotado para validade do estudo de viabilidade.

Alguns aspectos técnicos adotados para este trabalho podem ser alterados e eventualmente podem modificar a viabilidade do projeto.

Um destes aspectos é a seleção da turbina. Os valores que a turbina escolhida apresente para a temperatura e pressão de entrada e pressão de exaustão afetará o balanço de energias e massas, assim como afetará a seleção da caldeira, de forma a atender a demanda de vapor da turbina.

Os valores de PCI dos combustíveis adotados neste estudo variam conforme o combustível utilizado. Caso exista a possibilidade de queima de melhores combustíveis, ou seja, maiores PCIs, será necessário menor quantidade (em massa) do combustível, melhorando a viabilidade da central.

Uma das questões técnicas que deve ser discutida é a eficiência adotada para a caldeira nos cálculos para dimensionamento do sistema. A caldeira apresenta valores melhores para a eficiência quando realiza a queima do gás natural por queimadores do que quando realiza a queima do cavaco ou outra biomassa nas grelhas. Mas o valor adotado para a eficiência do equipamento total é 82%, independente da proporção de queima adotada para o combustível.

Ainda sobre a eficiência da caldeira, independente da proporção de queima utilizada a caldeira tem que manter a produção de tonelada de vapor constante para garantir a produção de energia elétrica demandada na turbina e também para que a eficiência possa ser considerada constante (82%) para efeitos de cálculo conforme folha de dados do equipamento. Esse equipamento opera diferentes eficiências conforme a quantidade de combustível na entrada e de vapor produzido.

6 CONCLUSÕES

A primeira análise econômica realizada neste trabalho, com resultados encontrados na tabela 4.5, encontrou viabilidade apenas quando a proporção da queima dos combustíveis é maior que 95% (em massa) de biomassa. Isso ocorre devido à diferença do preço dos combustíveis utilizados, o cavaco de madeira, neste estudo, é mais barato.

Na discussão foi incorporado um financiamento através do BNDES e houve melhora na viabilidade econômica para todas as proporções de queima dos combustíveis simulados. Mas, mesmo assim, é necessário mais que 95% de cavaco na queima para a viabilidade de operação.

Concluiu-se que, para determinar a viabilidade de um projeto de UTE, diversos pontos devem ser considerados, analisados e muito bem dimensionados e determinados:

- Deve ser realizado o balanço de massas e de energia conforme os requisitos de energia térmica e elétrica, deve ser considerado a vida útil da planta;
- Vale também modelar diversas alternativas de cogeração para alcançar maior eficiência e viabilidade da central;
- Os custos que envolvem a produção ou compra dos combustíveis devem ser muito bem projetados e adotados para todo o período de operação da planta. Além disso, o abastecimento de combustível deve ser muito bem previsto e garantido para toda a vida da usina;
- As águas utilizadas devem ser provenientes de um rio, represa, poço artesiano ou similar fonte que apresente vazão suficiente e não tenha custos para aquisição. Caso ocorram custos de aquisição provavelmente o projeto é inviável;
- Os custos de manutenção devem ser bem dimensionados conforme informações dos fabricantes e vendedores;
- O valor de venda da energia produzida adotado é de extrema importância e deve ser muito bem estudado, pois ao longo de todos os anos de operação da planta este valor deve variar e além disso essa é a única receita a ser considerada na usina. Deve ser previsto uma eventual compra de energia no mercado livre,

independente de ser auto-suficiente, caso seja necessário parada na planta e evitando multas correspondentes a falta de produção de energia pela planta;

- Os combustíveis utilizados devem apresentar, preferencialmente, altos valores de PCI, assim será necessária menor quantidade de massa para a queima;

- As caldeiras devem ser dimensionadas de forma a garantir a queima completa e contínua do combustível e obter um melhor aproveitamento da energia térmica resultante da combustão;

- É necessário realizar um estudo de impacto ambiental que a implantação deste projeto provoca no ambiente ao seu redor;

Qualquer um dos aspectos citados acima pode implicar na viabilidade ou inviabilidade do projeto.

Para viabilizar o projeto é fundamental garantir suprimento de combustível, de mercado, qualidade técnica de operação e manutenção. Em geral, as “receitas” destes projetos são a garantia de próprio financiamento.

Assim, este trabalho estudou e caracterizou possível configuração para uma planta de geração termoelétrica a vapor, utilizando cavaco de madeira e o gás natural. Para isso foi dimensionado os balanços de massa e de energia para o ciclo térmico a vapor.

O potencial de utilização dos dois combustíveis, gás natural e cavaco de madeira, em uma central termoelétrica foram estudados. Entretanto, para os valores adotados neste estudo, a viabilidade foi alcançada apenas para operação com mais de 95% de queima de biomassa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altafini, C. R., Notas de aula disciplina de máquinas térmicas apostila sobre caldeiras. Universidade de Caxias do Sul, 2002.
- Bridgwater A.V., Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal, numero 91, ano 2003, páginas 87-102.
- Cortez C.L., Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso: AES Eletropaulo. Tese de doutorado Programa de Pós-Graduação em Energia EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo.
- Dantas D.N., Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. Tese de mestrado Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.
- Dantas Filho P.L., Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo. Tese de mestrado Programa de Pós graduação em Energia EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, 2009.
- Dornburg, V., Faaij, A. P. C., Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. Publicado em Biomass and Bioenergy número 21, ano 2001, páginas 91-108.
- Erhart T., Strzalka R., Eicker U., Infield D., Performance analysis of a biomass ORC poly-generation system. 2nd European Conference on polygeneration, april 2011.

- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles Jr., T. R., Miles, T. R., Combustion properties of biomass. Publicado em Fuel Processing Technology numero 54, ano 1998, páginas 17–46.
- Martins L. S., Geração de energia através de biomassa. Projeto de graduação apresentado ao departamento de engenharia elétrica do centro tecnológico da universidade federal do Espírito Santo, fevereiro de 2006.
- Moraes T., “Estudo de Viabilidade Técnica-Econômica para Instalação de Caldeiras de Recuperação em Motores de Combustão operando com Óleo Combustível. Monografia apresentada ao PECE/Universidade de São Paulo, 2006.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N. Princípios de Termodinâmica para engenharia, 4a edição, LTC Editora, 2002.
- Obernberger I, Thonhofer P., Reisenhofer E., Description and evaluation of the new 1,000kWel organic rankine cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria. Publicado em Euroheat & Power, volume 10/2002.
- Paro A.C., Uma metodologia para gestão de eficiência energética em cantrais de cogeração a biomassa: aplicação ao bagaço de cana. Tese de doutorado Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- Puc-Rio – Apostila Ciclo de Rankine Tradicional e Inovador. Certificação Digital Nº 0310250/CA.
- Quirino, W. F., Do Vale, A. T., Andrade, A. P. A., Abreu, V. L. S., Azevedo, A. C. S. Poder Calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. Publicado na revista da madeira número 89, abril 2005, paginas 100-106.
- Rino G., Apresentação “Eficiência Energética com turbinas a vapor”, IV Congresso Internacional de Produtos de Madeira Sólida de Florestas Plantadas, Curitiba, 19-21 de novembro de 2008.

Simões-Moreira, J. R. Notas de aula do curso de termodinâmica, PECE/ Universidade de São Paulo.

Smejkal Q., Sarlej M. and Stehlik P. (2009), New unit for clean energy production from contaminated biomass (1 to 3 MWt) – examples of process design. Chemical Engineering Transactions, 18, 57-62 DOI: 10.3303/CET0918007.

Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van Wylen, G. J. Fundamentos da Termodinâmica, 6ª edição, Edgard Blucher, SP, 2003.

Swithenbank, J., Chen, Q., Zhang, X., Sharifi, V., Wood Would Burn. Publicado em Biomass and Bioenergy número 35, ano 2011, páginas 999-1007.

Tabela de Poderes Caloríficos da Aalborg industries, fabricante de caldeiras, com informações de poder calorífico inferior dos combustíveis utilizados para projeto de caldeiras.

Deliberação ARSESP No 283, de 08-12-2011 para tarifas do gás natural da Comgás.

Sites e datas de acesso:

<http://www.coopermiti.com.br/educacao/cavaco.pdf>, acesso em 10 /08/2012.

<http://www.fluidbrasil.com.br/sistemas.html>, acesso em 17/08/2012

<http://www.lippel.com.br/br/aquecimento-combustao-secagem.html>, acesso em 17/08/2012

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Biomassa>, acesso em 10/08/2012

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Combust%C3%A3o>, acesso em 20/08/2012

[http://www.isa.utl.pt/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-](http://www.isa.utl.pt/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-E818923BF0D0/FinalDownload/DownloadId-23593C743CE8480D3E1E9C754DCA330E/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-E818923BF0D0/def/interreg/docs/2P.5.pdf)

[E818923BF0D0/FinalDownload/DownloadId-](http://www.isa.utl.pt/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-E818923BF0D0/FinalDownload/DownloadId-23593C743CE8480D3E1E9C754DCA330E/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-E818923BF0D0/def/interreg/docs/2P.5.pdf)

[23593C743CE8480D3E1E9C754DCA330E/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-](http://www.isa.utl.pt/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-E818923BF0D0/def/interreg/docs/2P.5.pdf)

[E818923BF0D0/def/interreg/docs/2P.5.pdf](http://www.isa.utl.pt/80D32C19-1C2F-45C3-BD8E-E818923BF0D0/def/interreg/docs/2P.5.pdf), acesso em 14/09/2012

http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=3&ID_area=2&ID_sub_area=2, acesso em 14/09/2012

<http://www.lippel.com.br/br/picadores-de-madeira/cavacos-de-madeira.html>, acesso em 14/09/2012

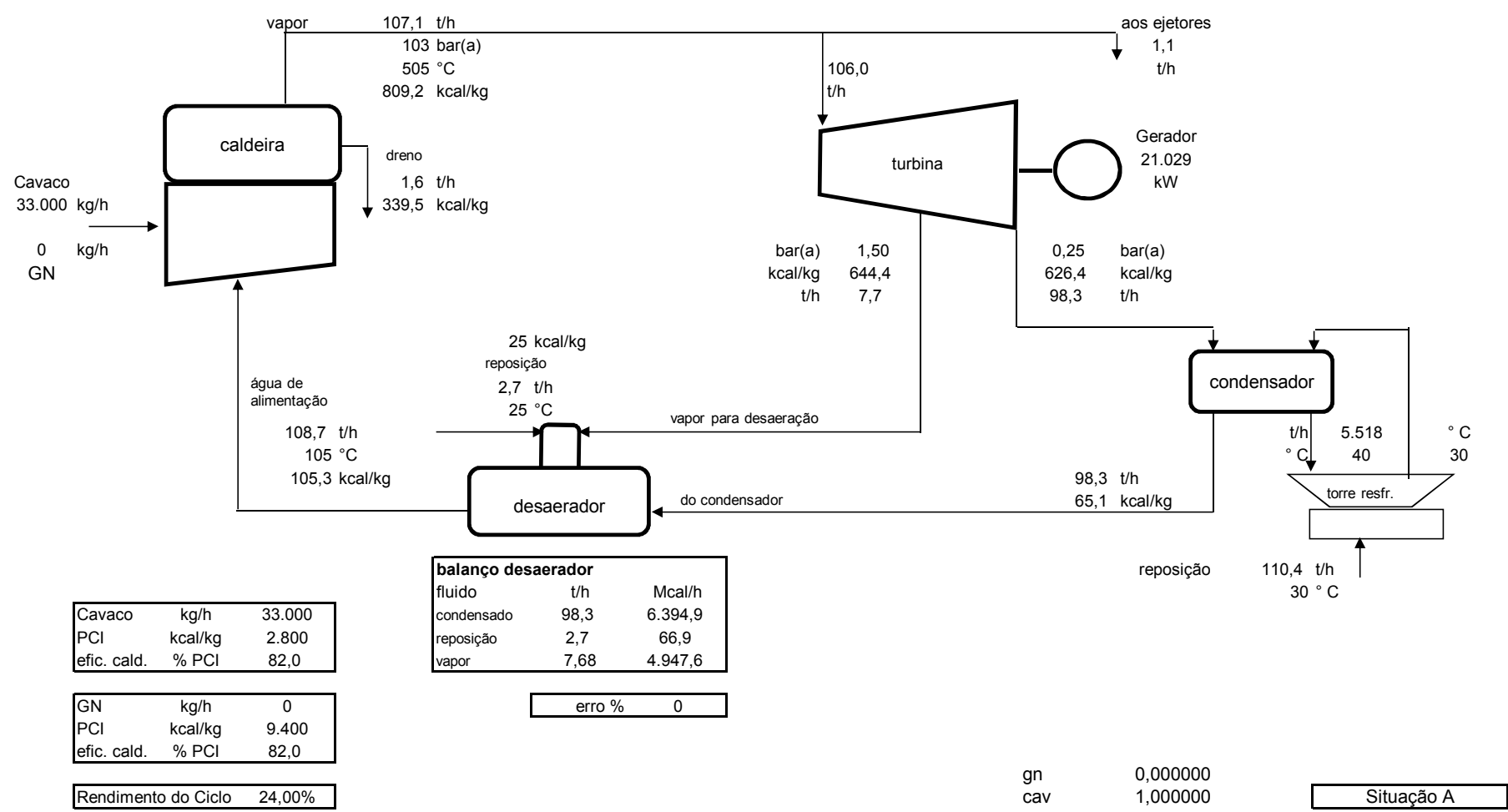
8 APÊNDICES

APÊNDICE A - Planilhas com modelo do ciclo térmico e análise econômica correspondente. As simulações apresentadas correspondem à situação A-D (conforme tabela 4.4) para valores de entrada dos combustíveis.

APÊNDICE B – Tabela de propriedades termodinâmicas da água. Fonte: (Sonntag, 2003).

APÊNDICE C - Planilhas com análise econômica correspondente as situações A e B, com financiamento de 60%, taxa de juros de 3,5% e período de amortização de 15 anos.

Apêndice A



Apêndice A

ANÁLISE ECONÔMICA		Situação A
Potencia da planta		20.000,00 kW
Cálculo do Custo Anual de Gás Natural - Conforme Deliberação Arsesp - Comgás Segmento Termoelétricas		
Densidade do GN 20 °C 1 atm		0,76 kg/m³
Consumo total de GN na Planta		0,00 kg/h
Consumo total de GN na Planta		0,00 m³/ano
Comgás - Termo Fixo		0,699311 R\$/m³
Comgás - Termo Variável		0,037432 R\$/m³
Valor do ICMS		12,00 %
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO FIXO		0,00 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO VARIÁVEL		0,00 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DE GÁS NATURAL COM ICMS		0,00 R\$/ano
Tarifa Média do GN com ICMS	#DIV/0!	R\$/m³
Tarifa Média do GN com ICMS	#DIV/0!	R\$/kg
Cálculo do Custo Anual de Cavaco de Madeira		
Consumo total de cavaco de madeira na planta		33.000,00 kg/h
Consumo total de cavaco de madeira na planta		285.120,00 ton/ano
Preço da tonelada de cavaco de madeira	100,00	R\$/ton
CUSTO ANUAL TOTAL DE CAVACO DE MADEIRA		28.512.000,00 R\$/ano
Tarifa Média do Cavaco de Madeira		0,10 R\$/kg
Cálculo do Custo Anual do Uso de Águas		
Quantidade de água desmi de make-up do desaerador necessária por hora		2,68 t/h
Densidade da água desmi (1kg/litro ou 1ton/m³)		1,00 ton/m³
Preço do litro de água desmi 25grC	2,00	R\$/m³
CUSTO ANUAL TOTAL DE ÁGUA DESMI PARA MAKE-UP DESAERADOR		46.247,86 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DO USO DE ÁGUAS		46.247,86 R\$/ano
Equipamentos		
Custo Turbina a Vapor Condensação 20MW + Condensador		10.000.000,00 R\$
Custo Gerador		8.000.000,00 R\$
Custo Caldeira Biomassa - GN, 110tonv/h, 100bar + Desaerador + Bomba Alimentação		30.000.000,00 R\$
Custo BOP		8.000.000,00 R\$
Custo Torre de Resfriamento		1.500.000,00 R\$
Custo Obra Civil		12.000.000,00 R\$
CUSTO TOTAL EQUIPAMENTOS		69.500.000,00 R\$
Investimento por kWh deve ser cerca de 3000 a 3500 R\$/kWh		3.475,00 R\$/kWh
Manutenção		
Custo de manutenção	0,020	R\$/kWh
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO		3.456.000,00 R\$/ano
Venda de energia:		
Mercado Livre, valor de venda de energia	300,00	R\$/MWh
RECEITA COM A VENDA DE ENERGIA PARA MERCADO LIVRE		51.840.000,00 R\$/ano

Apêndice A

VIABILIDADE ECONÔMICA		Situação A
Custo Operacional		
Custo Anual de Cavaco de Madeira	28.512.000,00 R\$/ano	
Custo Anual de Gás Natural	0,00 R\$/ano	
Custo Anual das Águas	46.247,86 R\$/ano	
Manutenção	3.456.000,00 R\$/ano	
Custo Operacional TOTAL	32.014.247,86 R\$/ano	
Investimentos		
Aquisição de Equipamentos	69.500.000,00 R\$	
Investimento TOTAL	69.500.000,00 R\$	

Tempo do Investimento anos

Financiamento

Valor Financiado R\$ -

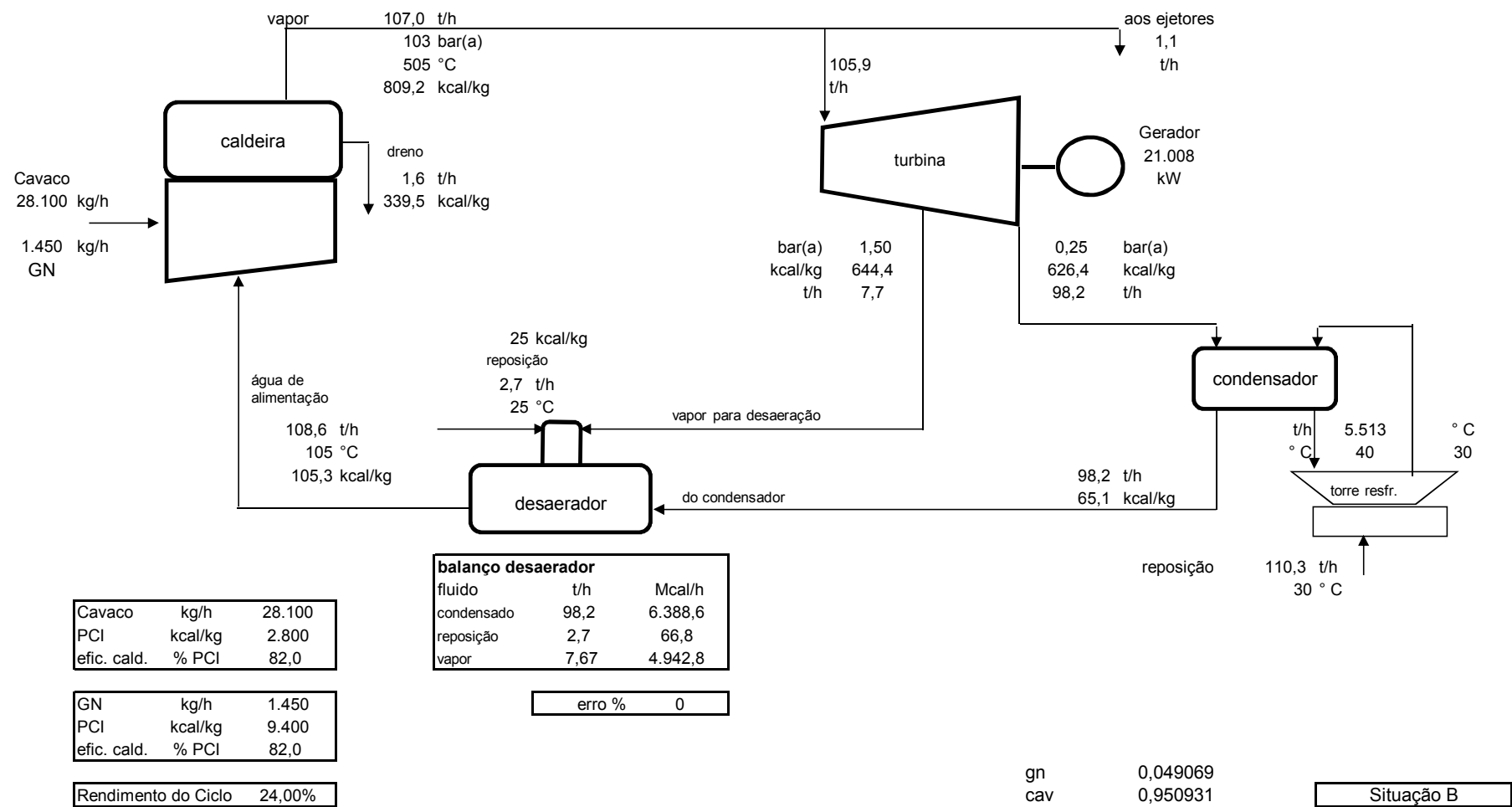
Juros

tempo amortização fina anos

ANALISE DO INVESTIMENTO		
PERÍODO DE ANÁLISE		20 anos
TAXA DE DESCONTO		12% a.a.
INVESTIMENTO INICIAL		69.500.000,00 R\$
PAYBACK SIMPLES	R\$	5,50 anos
VPL	R\$	23.502.481,93
TIR		17,29%

Situação A	Anos:	1	2	3	4	5	6						
Investimento	-R\$	69.500.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -						
Financiamento	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -						
Receita	R\$	-	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00						
Custos Operacionais	R\$	-	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86						
Despesas (1% do inves)	R\$	-	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00						
Juros	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -						
LAIR / EBITDA	-R\$	69.500.000,00	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14						
IR + CSSL (34%)	R\$	-	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73						
Lucro Líquido	-R\$	69.500.000,00	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41						
Amortização	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -						
FCL Acionista	-R\$	69.500.000,00	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41						
7		8		9		10		11		12		13	
R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00
-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86
-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00
R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14
-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73
R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41
R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41
14		15		16		17		18		19		20	
R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00	R\$	51.840.000,00
-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86	-R\$	32.014.247,86
-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00	-R\$	695.000,00
R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14	R\$	19.130.752,14
-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73	-R\$	6.504.455,73
R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41	R\$	12.626.296,41						

Apêndice A



Apêndice A

ANÁLISE ECONÔMICA		Situação B
Potencia da planta		20.000,00 kW
Cálculo do Custo Anual de Gás Natural - Conforme Deliberação Arsesp - Comgás Segmento Termoelétricas		
Densidade do GN 20 °C 1 atm		0,76 kg/m³
Consumo total de GN na Planta		1.450,00 kg/h
Consumo total de GN na Planta		16.484.210,53 m³/ano
Comgás - Termo Fixo		0,699311 R\$/m³
Comgás - Termo Variável		0,037432 R\$/m³
Valor do ICMS		12,00 %
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO FIXO		11.527.589,75 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO VARIÁVEL		617.036,97 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DE GÁS NATURAL COM ICMS		13.601.981,92 R\$/ano
Tarifa Média do GN com ICMS		0,83 R\$/m³
Tarifa Média do GN com ICMS		1,09 R\$/kg
Cálculo do Custo Anual de Cavaco de Madeira		
Consumo total de cavaco de madeira na planta		28.100,00 kg/h
Consumo total de cavaco de madeira na planta		242.784,00 ton/ano
Preço da tonelada de cavaco de madeira		100,00 R\$/ton
CUSTO ANUAL TOTAL DE CAVACO DE MADEIRA		24.278.400,00 R\$/ano
Tarifa Média do Cavaco de Madeira		0,10 R\$/kg
Cálculo do Custo Anual do Uso de Águas		
Quantidade de água desmi de make-up do desaerador necessária por hora		2,67 t/h
Densidade da água desmi (1kg/litro ou 1ton/m³)		1,00 ton/m³
Preço do litro de água desmi 25grC		2,00 R\$/m³
CUSTO ANUAL TOTAL DE ÁGUA DESMI PARA MAKE-UP DESAERADOR		46.202,81 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DO USO DE ÁGUAS		46.202,81 R\$/ano
Equipamentos		
Custo Turbina a Vapor Condensação 20MW + Condensador		10.000.000,00 R\$
Custo Gerador		8.000.000,00 R\$
Custo Caldeira Biomassa - GN, 110tonv/h, 100bar + Desaerador + Bomba Alimentação		30.000.000,00 R\$
Custo BOP		8.000.000,00 R\$
Custo Torre de Resfriamento		1.500.000,00 R\$
Custo Obra Civil		12.000.000,00 R\$
CUSTO TOTAL EQUIPAMENTOS		69.500.000,00 R\$
Investimento por kWh deve ser cerca de 3000 a 3500 R\$/kWh		3.475,00 R\$/kWh
Manutenção		
Custo de manutenção		0,020 R\$/kWh
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO		3.456.000,00 R\$/ano
Venda de energia:		
Mercado Livre, valor de venda de energia		300,00 R\$/MWh
RECEITA COM A VENDA DE ENERGIA PARA MERCADO LIVRE		51.840.000,00 R\$/ano

Apêndice A

VIABILIDADE ECONÔMICA	Situação B
Custo Operacional	
Custo Anual de Cavaco de Madeira	24.278.400,00 R\$/ano
Custo Anual de Gás Natural	13.601.981,92 R\$/ano
Custo Anual das Águas	46.202,81 R\$/ano
Manutenção	3.456.000,00 R\$/ano
Custo Operacional TOTAL	41.382.584,73 R\$/ano
Investimentos	
Aquisição de Equipamentos	69.500.000,00 R\$
Investimento TOTAL	69.500.000,00 R\$

Tempo do Investimento anos

Financiamento

Valor Financiado R\$ -

Juros

tempo amortização fina anos

ANÁLISE DO INVESTIMENTO	
PERÍODO DE ANÁLISE	20 anos
TAXA DE DESCONTO	12% a.a.
INVESTIMENTO INICIAL	69.500.000,00 R\$
PAYBACK SIMPLES	R\$ 10,79 anos
VPL	R\$ (22.040.870,18)
TIR	6,44%

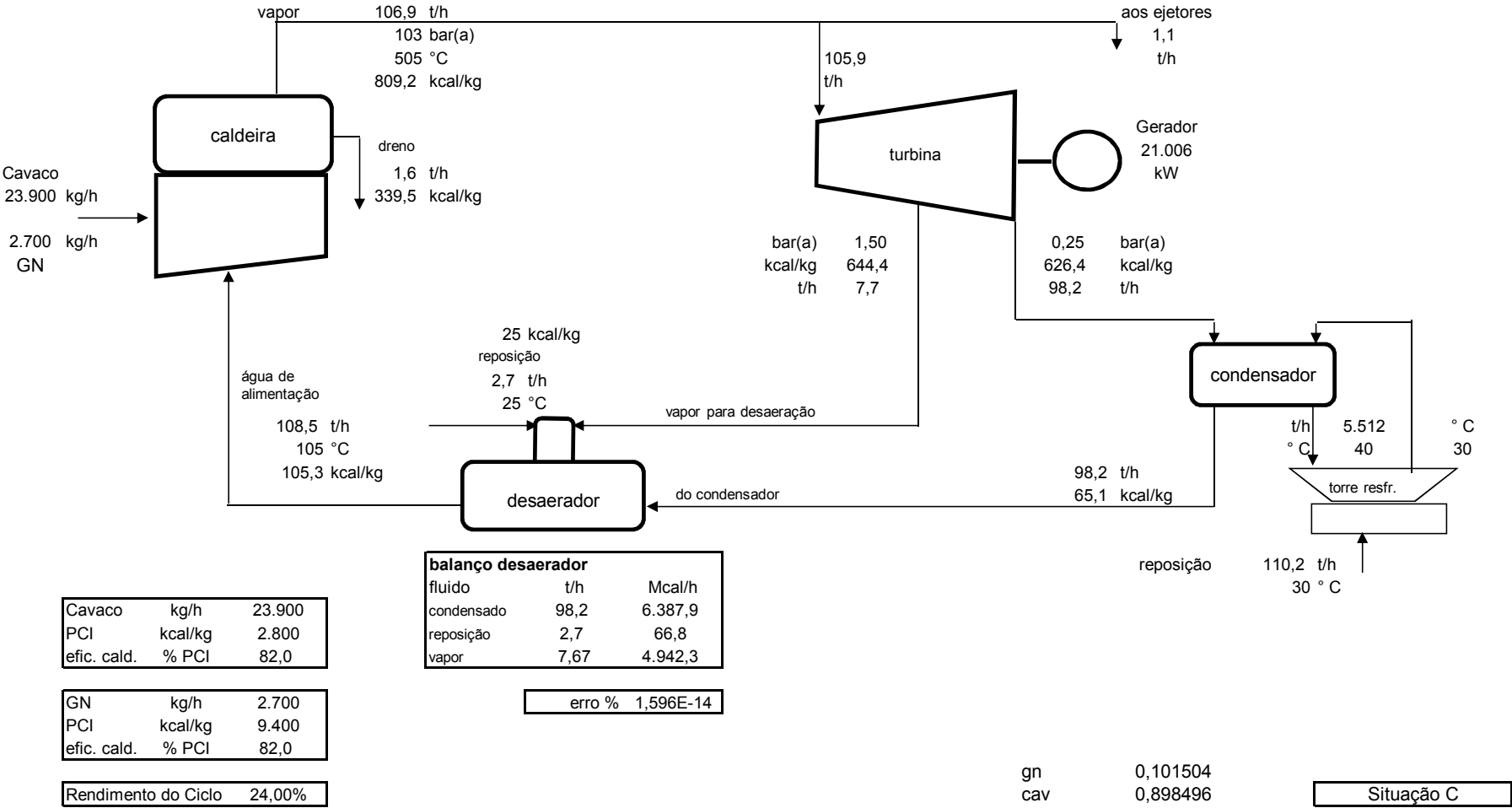
Apêndice A

Situação B	Anos:	1	2	3	4	5	6
Investimento	-R\$	69.500.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Financiamento	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Receita	R\$	-	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
Custos Operacionais	R\$	-	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73
Despesas (1% do inves)	R\$	-	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
Juros	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
LAIR / EBITDA	-R\$	69.500.000,00	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27
IR + CSSL (34%)	R\$	-	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19
Lucro Líquido	-R\$	69.500.000,00	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07
Amortização	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
FCL Acionista	-R\$	69.500.000,00	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07

7	8	9	10	11	12	13
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27
-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19
R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07

14	15	16	17	18	19	20
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27
-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19
R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07

Apêndice A



Apêndice A

ANÁLISE ECONÔMICA		Situação C
Potencia da planta		20.000,00 kW
Cálculo do Custo Anual de Gás Natural - Conforme Deliberação Arsesp - Comgás Segmento Termoelétricas		
Densidade do GN 20 °C 1 atm		0,76 kg/m³
Consumo total de GN na Planta		2.700,00 kg/h
Consumo total de GN na Planta		30.694.736,84 m³/ano
Comgás - Termo Fixo		0,699311 R\$/m³
Comgás - Termo Variável		0,037432 R\$/m³
Valor do ICMS		12,00 %
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO FIXO		21.465.167,12 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO VARIÁVEL		1.148.965,39 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DE GÁS NATURAL COM ICMS		25.327.828,41 R\$/ano
Tarifa Média do GN com ICMS		0,83 R\$/m³
Tarifa Média do GN com ICMS		1,09 R\$/kg
Cálculo do Custo Anual de Cavaco de Madeira		
Consumo total de cavaco de madeira na planta		23.900,00 kg/h
Consumo total de cavaco de madeira na planta		206.496,00 ton/ano
Preço da tonelada de cavaco de madeira		100,00 R\$/ton
CUSTO ANUAL TOTAL DE CAVACO DE MADEIRA		20.649.600,00 R\$/ano
Tarifa Média do Cavaco de Madeira		0,10 R\$/kg
Cálculo do Custo Anual do Uso de Águas		
Quantidade de água desmi de make-up do desaerador necessária por hora		2,67 t/h
Densidade da água desmi (1kg/litro ou 1ton/m³)		1,00 ton/m³
Preço do litro de água desmi 25grC		2,00 R\$/m³
CUSTO ANUAL TOTAL DE ÁGUA DESMI PARA MAKE-UP DESAERADOR		46.197,81 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DO USO DE ÁGUAS		46.197,81 R\$/ano
Equipamentos		
Custo Turbina a Vapor Condensação 20MW + Condensador		10.000.000,00 R\$
Custo Gerador		8.000.000,00 R\$
Custo Caldeira Biomassa - GN, 110tonv/h, 100bar + Desaerador + Bomba Alimentação		30.000.000,00 R\$
Custo BOP		8.000.000,00 R\$
Custo Torre de Resfriamento		1.500.000,00 R\$
Custo Obra Civil		12.000.000,00 R\$
CUSTO TOTAL EQUIPAMENTOS		69.500.000,00 R\$
Investimento por kWh deve ser cerca de 3000 a 3500 R\$/kWh		3.475,00 R\$/kWh
Manutenção		
Custo de manutenção		0,020 R\$/kWh
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO		3.456.000,00 R\$/ano
Venda de energia:		
Mercado Livre, valor de venda de energia		300,00 R\$/MWh
RECEITA COM A VENDA DE ENERGIA PARA MERCADO LIVRE		51.840.000,00 R\$/ano

Apêndice A

VIABILIDADE ECONÔMICA	Situação C
Custo Operacional	
Custo Anual de Cavaco de Madeira	20.649.600,00 R\$/ano
Custo Anual de Gás Natural	25.327.828,41 R\$/ano
Custo Anual das Águas	46.197,81 R\$/ano
Manutenção	3.456.000,00 R\$/ano
Custo Operacional TOTAL	49.479.626,21 R\$/ano
Investimentos	
Aquisição de Equipamentos	69.500.000,00 R\$
Investimento TOTAL	69.500.000,00 R\$

Tempo do Investimento anos

Financiamento

Valor Financiado R\$ -

Juros

tempo amortização fina anos

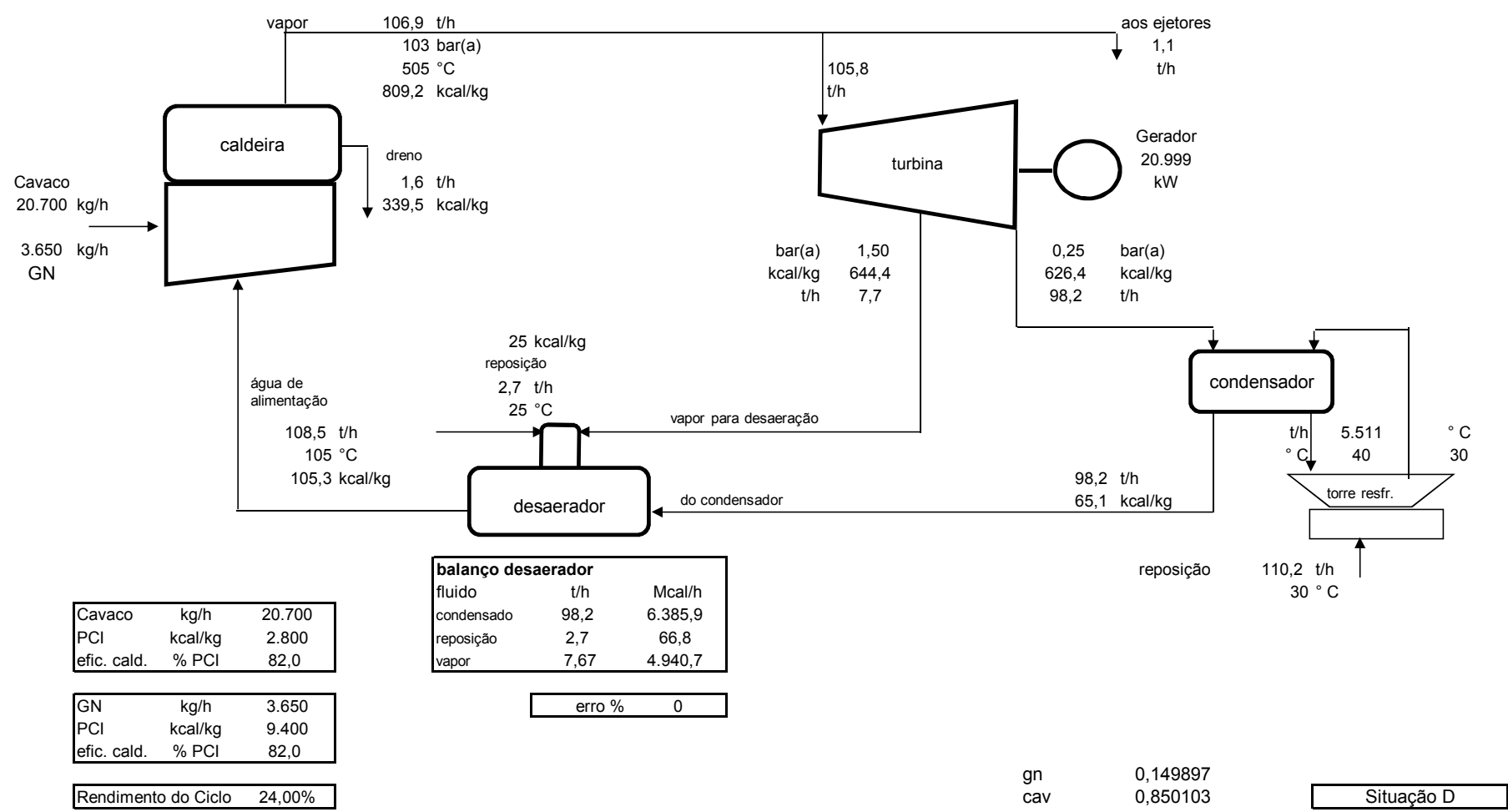
ANÁLISE DO INVESTIMENTO	
PERÍODO DE ANÁLISE	20 anos
TAXA DE DESCONTO	12% a.a.
INVESTIMENTO INICIAL	69.500.000,00 R\$
PAYBACK SIMPLES	R\$ 63,23 anos
VPL	R\$ (61.403.930,68)
TIR	-9,91%

Apêndice A

Situação C	Anos:	1	2	3	4	5	6
Investimento	-R\$	69.500.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Financiamento	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Receita	R\$	-	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
Custos Operacionais	R\$	-	-R\$ 49.479.626,21	-R\$ 49.479.626,21	-R\$ 49.479.626,21	-R\$ 49.479.626,21	-R\$ 49.479.626,21
Despesas (1% do inves)	R\$	-	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
Juros	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
LAIR / EBITDA	-R\$	69.500.000,00	R\$ 1.665.373,79	R\$ 1.665.373,79	R\$ 1.665.373,79	R\$ 1.665.373,79	R\$ 1.665.373,79
IR + CSSL (34%)	R\$	-	-R\$ 566.227,09	-R\$ 566.227,09	-R\$ 566.227,09	-R\$ 566.227,09	-R\$ 566.227,09
Lucro Líquido	-R\$	69.500.000,00	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70
Amortização	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
FCL Acionista	-R\$	69.500.000,00	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70	R\$ 1.099.146,70

[illegible][illegible]

Apêndice A



Apêndice A

ANÁLISE ECONÔMICA		Situação D
Potencia da planta		20.000,00 kW
Cálculo do Custo Anual de Gás Natural - Conforme Deliberação Arsesp - Comgás Segmento Termoelétricas		
Densidade do GN 20 °C 1 atm		0,76 kg/m³
Consumo total de GN na Planta		3.650,00 kg/h
Consumo total de GN na Planta		41.494.736,84 m³/ano
Comgás - Termo Fixo		0,699311 R\$/m³
Comgás - Termo Variável		0,037432 R\$/m³
Valor do ICMS		12,00 %
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO FIXO		29.017.725,92 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL - TERMO VARIÁVEL		1.553.230,99 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DE GÁS NATURAL COM ICMS		34.239.471,73 R\$/ano
Tarifa Média do GN com ICMS		0,83 R\$/m³
Tarifa Média do GN com ICMS		1,09 R\$/kg
Cálculo do Custo Anual de Cavaco de Madeira		
Consumo total de cavaco de madeira na planta		20.700,00 kg/h
Consumo total de cavaco de madeira na planta		178.848,00 ton/ano
Preço da tonelada de cavaco de madeira		100,00 R\$/ton
CUSTO ANUAL TOTAL DE CAVACO DE MADEIRA		17.884.800,00 R\$/ano
Tarifa Média do Cavaco de Madeira		0,10 R\$/kg
Cálculo do Custo Anual do Uso de Águas		
Quantidade de água desmi de make-up do desaerador necessária por hora		2,67 t/h
Densidade da água desmi (1kg/litro ou 1ton/m³)		1,00 ton/m³
Preço do litro de água desmi 25grC		2,00 R\$/m³
CUSTO ANUAL TOTAL DE ÁGUA DESMI PARA MAKE-UP DESAERADOR		46.182,79 R\$/ano
CUSTO ANUAL TOTAL DO USO DE ÁGUAS		46.182,79 R\$/ano
Equipamentos		
Custo Turbina a Vapor Condensação 20MW + Condensador		10.000.000,00 R\$
Custo Gerador		8.000.000,00 R\$
Custo Caldeira Biomassa - GN, 110tonv/h, 100bar + Desaerador + Bomba Alimentação		30.000.000,00 R\$
Custo BOP		8.000.000,00 R\$
Custo Torre de Resfriamento		1.500.000,00 R\$
Custo Obra Civil		12.000.000,00 R\$
CUSTO TOTAL EQUIPAMENTOS		69.500.000,00 R\$
Investimento por kWh deve ser cerca de 3000 a 3500 R\$/kWh		3.475,00 R\$/kWh
Manutenção		
Custo de manutenção		0,020 R\$/kWh
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO		3.456.000,00 R\$/ano
Venda de energia:		
Mercado Livre, valor de venda de energia		300,00 R\$/MWh
RECEITA COM A VENDA DE ENERGIA PARA MERCADO LIVRE		51.840.000,00 R\$/ano

Apêndice A

VIABILIDADE ECONÔMICA	Situação D
Custo Operacional	
Custo Anual de Cavaco de Madeira	17.884.800,00 R\$/ano
Custo Anual de Gás Natural	34.239.471,73 R\$/ano
Custo Anual das Águas	46.182,79 R\$/ano
Manutenção	3.456.000,00 R\$/ano
Custo Operacional TOTAL	55.626.454,53 R\$/ano
Investimentos	
Aquisição de Equipamentos	69.500.000,00 R\$
Investimento TOTAL	69.500.000,00 R\$

Tempo do Investimento anos

Financiamento

Valor Financiado R\$ -

Juros

tempo amortização fina anos

ANÁLISE DO INVESTIMENTO	
PERÍODO DE ANÁLISE	20 anos
TAXA DE DESCONTO	12% a.a.
INVESTIMENTO INICIAL	69.500.000,00 R\$
PAYBACK SIMPLES	-R\$ 23,50 anos
VPL	R\$ (91.286.200,07)
TIR	#NÚM!

Apêndice A

Situação D	Anos:	1	2	3	4	5	6
Investimento	-R\$	69.500.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Financiamento	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Receita	R\$	-	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
Custos Operacionais	R\$	-	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53
Despesas (1% do inves)	R\$	-	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
Juros	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
LAIR / EBITDA	-R\$	69.500.000,00	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53
IR + CSSL (34%)	R\$	-	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54
Lucro Líquido	-R\$	69.500.000,00	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99
Amortização	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
FCL Acionista	-R\$	69.500.000,00	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99

7	8	9	10	11	12	13
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53
R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54
-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99

14	15	16	17	18	19	20
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53	-R\$ 55.626.454,53
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53	-R\$ 4.481.454,53
R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54	R\$ 1.523.694,54
-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99	-R\$ 2.957.759,99

TABELAS, FIGURAS E DIAGRAMAS

Tabela A.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela A.1.1 — Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C T	Pressão kPa p	Volume específico m ³ /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido	Vapor	Líquido	Evap.	Vapor	Líquido	Evap.	Vapor	Líquido	Evap.	Vapor
		sat. v_f	sat. v_g	sat. u_f	u_{fg}	sat. u_g	sat. h_f	h_{fg}	sat. h_g	sat. s_f	s_{fg}	sat. s_g
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,3	2375,3	0,00	2501,3	2501,3	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,3	2382,2	20,98	2489,6	2510,5	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,2	2389,2	41,99	2477,7	2519,7	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,7051	0,001001	77,925	62,98	2333,1	2396,0	62,98	2465,9	2528,9	0,2245	9,5569	8,7813
20	2,3385	0,001002	57,790	83,94	2319,0	2402,9	83,94	2454,1	2538,1	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,1691	0,001003	43,359	104,86	2304,9	2409,8	104,87	2442,3	2547,2	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,2461	0,001004	32,893	125,77	2290,8	2416,6	125,77	2430,5	2556,2	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,6280	0,001006	25,216	146,65	2276,7	2423,4	146,66	2418,6	2565,3	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,3837	0,001008	19,523	167,53	2262,6	2430,1	167,54	2406,7	2574,3	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,5934	0,001010	15,258	188,41	2248,4	2436,8	188,42	2394,8	2583,2	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,032	209,30	2234,2	2443,5	209,31	2382,7	2592,1	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,568	230,19	2219,9	2450,1	230,20	2370,7	2600,9	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,671	251,09	2205,5	2456,6	251,11	2358,5	2609,6	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,033	0,001020	6,197	272,00	2191,1	2463,1	272,03	2346,2	2618,2	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,188	0,001023	5,042	292,93	2176,6	2469,5	292,96	2333,8	2626,8	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,578	0,001026	4,131	313,87	2162,0	2475,9	313,91	2321,4	2635,3	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,390	0,001029	3,407	334,84	2147,4	2482,2	334,88	2308,8	2643,7	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,834	0,001032	2,828	355,82	2132,6	2488,4	355,88	2296,0	2651,9	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,139	0,001036	2,361	376,82	2117,7	2494,5	376,90	2283,2	2660,1	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,554	0,001040	1,982	397,86	2102,7	2500,6	397,94	2270,2	2668,1	1,2500	6,1659	7,4158
MPa												
100	0,10135	0,001044	1,6729	418,91	2087,6	2506,5	419,02	2257,0	2676,0	1,3068	6,0480	7,3548
105	0,12082	0,001047	1,4194	440,00	2072,3	2512,3	440,13	2243,7	2683,8	1,3629	5,9328	7,2958
110	0,14328	0,001052	1,2102	461,12	2057,0	2518,1	461,27	2230,2	2691,5	1,4184	5,8202	7,2386
115	0,16906	0,001056	1,0366	482,28	2041,4	2523,7	482,46	2216,5	2699,0	1,4733	5,7100	7,1832
120	0,19853	0,001060	0,8919	503,48	2025,8	2529,2	503,69	2202,6	2706,3	1,5275	5,6020	7,1295
125	0,2321	0,001065	0,77059	524,72	2009,9	2534,6	524,96	2188,5	2713,5	1,5812	5,4962	7,0774
130	0,2701	0,001070	0,66850	546,00	1993,9	2539,9	546,29	2174,2	2720,5	1,6343	5,3925	7,0269
135	0,3130	0,001075	0,58217	567,34	1977,7	2545,0	567,67	2159,6	2727,3	1,6869	5,2907	6,9777
140	0,3613	0,001080	0,50885	588,72	1961,3	2550,0	589,11	2144,8	2733,9	1,7390	5,1908	6,9298
145	0,4154	0,001085	0,44632	610,16	1944,7	2554,9	610,61	2129,6	2740,3	1,7906	5,0926	6,8832
150	0,4759	0,001090	0,39278	631,66	1927,9	2559,5	632,18	2114,3	2746,4	1,8417	4,9960	6,8378
155	0,5431	0,001096	0,34676	653,23	1910,8	2564,0	653,82	2098,6	2752,4	1,8924	4,9010	6,7934

Tabela A.1.1 (Continuação) — Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C <i>T</i>	Pressão MPa <i>p</i>	Volume específico m³/kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido	Vapor	Líquido	Evap.	Vapor	Líquido	Evap.	Vapor	Líquido	Evap.	Vapor
		sat. <i>v_l</i>	sat. <i>v_v</i>	sat. <i>u_l</i>	<i>u_h</i>	sat. <i>u_v</i>	sat. <i>h_l</i>	<i>h_h</i>	sat. <i>h_v</i>	sat. <i>s_l</i>	<i>s_h</i>	sat. <i>s_v</i>
160	0,6178	0,001102	0,30706	674,85	1893,5	2568,4	675,53	2082,6	2758,1	1,9426	4,8075	6,7501
165	0,7005	0,001108	0,27269	696,55	1876,0	2572,5	697,32	2066,2	2763,5	1,9924	4,7153	6,7078
170	0,7917	0,001114	0,24283	718,31	1858,1	2576,5	719,20	2049,5	2768,7	2,0418	4,6244	6,6663
175	0,8920	0,001121	0,21680	740,16	1840,0	2580,2	741,16	2032,4	2773,6	2,0909	4,5347	6,6256
180	1,0022	0,001127	0,19405	762,08	1821,6	2583,7	763,21	2015,0	2778,2	2,1395	4,4461	6,5857
185	1,1227	0,001134	0,17409	784,08	1802,9	2587,0	785,36	1997,1	2782,4	2,1878	4,3586	6,5464
190	1,2544	0,001141	0,15654	806,17	1783,8	2590,0	807,61	1978,8	2786,4	2,2358	4,2720	6,5078
195	1,3978	0,001149	0,14105	828,36	1764,4	2592,8	829,96	1960,0	2790,0	2,2835	4,1863	6,4697
200	1,5538	0,001156	0,12736	850,64	1744,7	2595,3	852,43	1940,7	2793,2	2,3308	4,1014	6,4322
205	1,7230	0,001164	0,11521	873,02	1724,5	2597,5	875,03	1921,0	2796,0	2,3779	4,0172	6,3951
210	1,9063	0,001173	0,10441	895,51	1703,9	2599,4	897,75	1900,7	2798,5	2,4247	3,9337	6,3584
215	2,1042	0,001181	0,09479	918,12	1682,9	2601,1	920,61	1879,9	2800,5	2,4713	3,8507	6,3221
220	2,3178	0,001190	0,08619	940,85	1661,5	2602,3	943,61	1858,5	2802,1	2,5177	3,7683	6,2860
225	2,5477	0,001199	0,07849	963,72	1639,6	2603,3	966,77	1836,5	2803,3	2,5639	3,6863	6,2502
230	2,7949	0,001209	0,07158	986,72	1617,2	2603,9	990,10	1813,8	2803,9	2,6099	3,6047	6,2146
235	3,0601	0,001219	0,06536	1009,88	1594,2	2604,1	1013,61	1790,5	2804,1	2,6557	3,5233	6,1791
240	3,3442	0,001229	0,05976	1033,19	1570,8	2603,9	1037,31	1766,5	2803,8	2,7015	3,4422	6,1436
245	3,6482	0,001240	0,05470	1056,69	1546,7	2603,4	1061,21	1741,7	2802,9	2,7471	3,3612	6,1083
250	3,9730	0,001251	0,05013	1080,37	1522,0	2602,4	1085,34	1716,2	2801,5	2,7927	3,2802	6,0729
255	4,3195	0,001263	0,04598	1104,26	1496,7	2600,9	1109,72	1689,8	2799,5	2,8382	3,1992	6,0374
260	4,6886	0,001276	0,04220	1128,37	1470,6	2599,0	1134,35	1662,5	2796,9	2,8837	3,1181	6,0018
265	5,0813	0,001289	0,03877	1152,72	1443,9	2596,6	1159,27	1634,3	2793,6	2,9293	3,0368	5,9661
270	5,4987	0,001302	0,03564	1177,33	1416,3	2593,7	1184,49	1605,2	2789,7	2,9750	2,9551	5,9301
275	5,9418	0,001317	0,03279	1202,23	1387,9	2590,2	1210,05	1574,9	2785,0	3,0208	2,8730	5,8937
280	6,4117	0,001332	0,03017	1227,43	1358,7	2586,1	1235,97	1543,6	2779,5	3,0667	2,7903	5,8570
285	6,9094	0,001348	0,02777	1252,98	1328,4	2581,4	1262,29	1511,0	2773,3	3,1129	2,7069	5,8198
290	7,4360	0,001366	0,02557	1278,89	1297,1	2576,0	1289,04	1477,1	2766,1	3,1593	2,6227	5,7821
295	7,9928	0,001384	0,02354	1305,21	1264,7	2569,9	1316,27	1441,8	2758,0	3,2061	2,5375	5,7436
300	8,5810	0,001404	0,02167	1331,97	1231,0	2563,0	1344,01	1404,9	2748,9	3,2533	2,4511	5,7044
305	9,2018	0,001425	0,01995	1359,22	1195,9	2555,2	1372,33	1366,4	2738,7	3,3009	2,3633	5,6642
310	9,8566	0,001447	0,01835	1387,03	1159,4	2546,4	1401,29	1326,0	2727,3	3,3492	2,2737	5,6229
315	10,547	0,001472	0,01687	1415,44	1121,1	2536,6	1430,97	1283,5	2714,4	3,3981	2,1821	5,5803
320	11,274	0,001499	0,01549	1444,55	1080,9	2525,5	1461,45	1238,6	2700,1	3,4479	2,0882	5,5361
330	12,845	0,001561	0,012996	1505,24	993,7	2498,9	1525,29	1140,6	2665,8	3,5506	1,8909	5,4416
340	14,586	0,001638	0,010797	1570,26	894,3	2464,5	1594,15	1027,9	2622,0	3,6593	1,6763	5,3356
350	16,514	0,001740	0,008813	1641,81	776,6	2418,4	1670,54	893,4	2563,9	3,7776	1,4336	5,2111
360	18,651	0,001892	0,006945	1725,19	626,3	2351,5	1760,48	720,5	2481,0	3,9146	1,1379	5,0525
370	21,028	0,002213	0,004926	1843,84	384,7	2228,5	1890,37	441,8	2332,1	4,1104	0,6868	4,7972
374,14	22,089	0,003155	0,003155	2029,58	0,0	2029,6	2099,26	0,0	2099,3	4,4297	0,0000	4,4297

Tabela A.1.2 — Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa <i>p</i>	Temp. °C <i>T</i>	Volume específico m³/kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido sat. <i>v_l</i>	Vapor sat. <i>v_v</i>	Líquido sat. <i>u_l</i>	Evap. <i>u_{lv}</i>	Vapor sat. <i>u_v</i>	Líquido sat. <i>h_l</i>	Evap. <i>h_{lv}</i>	Vapor sat. <i>h_v</i>	Líquido sat. <i>s_l</i>	Evap. <i>s_{lv}</i>	Vapor sat. <i>s_v</i>
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0,00	2375,3	2375,3	0,00	2501,3	2501,3	0,0000	9,1562	9,1562
1,0	6,98	0,001000	129,208	29,29	2355,7	2385,0	29,29	2484,9	2514,2	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,980	54,70	2338,6	2393,3	54,70	2470,6	2525,3	0,1956	8,6322	8,8278
2,0	17,50	0,001001	67,004	73,41	2326,0	2399,5	73,47	2460,0	2533,5	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,254	88,47	2315,9	2404,4	88,47	2451,6	2540,0	0,3120	8,3311	8,6431
3,0	24,08	0,001003	45,665	101,03	2307,5	2408,5	101,03	2444,5	2545,5	0,3545	8,2231	8,5775
4,0	28,96	0,001004	34,800	121,44	2293,7	2415,2	121,44	2432,9	2554,4	0,4226	8,0520	8,4746
5,0	32,88	0,001005	28,193	137,79	2282,7	2420,5	137,79	2423,7	2561,4	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2261,7	2430,5	168,77	2406,0	2574,8	0,5763	7,6751	8,2514
10,0	45,81	0,001010	14,674	191,79	2246,1	2437,9	191,81	2392,8	2584,6	0,6492	7,5010	8,1501
15,0	53,97	0,001014	10,022	225,90	2222,8	2448,7	225,91	2373,1	2599,1	0,7548	7,2536	8,0084
20,0	60,06	0,001017	7,649	251,35	2205,4	2456,7	251,38	2358,3	2609,7	0,8319	7,0766	7,9085
25,0	64,97	0,001020	6,204	271,88	2191,2	2463,1	271,90	2346,3	2618,2	0,8930	6,9383	7,8313
30,0	69,10	0,001022	5,229	289,18	2179,2	2468,4	289,21	2336,1	2625,3	0,9439	6,8247	7,7686
40,0	75,87	0,001026	3,993	317,51	2159,5	2477,0	317,55	2319,2	2636,7	1,0258	6,6441	7,6700
50,0	81,33	0,001030	3,240	340,42	2143,4	2483,8	340,47	2305,4	2645,9	1,0910	6,5029	7,5939
75,0	91,77	0,001037	2,217	384,29	2112,4	2496,7	384,36	2278,6	2663,0	1,2129	6,2434	7,4563
MPa												
0,100	99,62	0,001043	1,6940	417,33	2088,7	2506,1	417,44	2258,0	2675,5	1,3025	6,0568	7,3593
0,125	105,99	0,001048	1,3749	444,16	2069,3	2513,5	444,30	2241,1	2685,3	1,3739	5,9104	7,2843
0,150	111,37	0,001053	1,1593	466,92	2052,7	2519,6	467,08	2226,5	2693,5	1,4335	5,7897	7,2232
0,175	116,06	0,001057	1,0036	486,78	2038,1	2524,9	486,97	2213,6	2700,5	1,4848	5,6868	7,1717
0,200	120,23	0,001061	0,8857	504,47	2025,0	2529,5	504,68	2202,0	2706,6	1,5300	5,5970	7,1271
0,225	124,00	0,001064	0,7933	520,45	2013,1	2533,6	520,69	2191,3	2712,0	1,5705	5,5173	7,0878
0,250	127,43	0,001067	0,7187	535,08	2002,1	2537,2	535,34	2181,5	2716,9	1,6072	5,4455	7,0526
0,275	130,60	0,001070	0,6573	548,57	1992,0	2540,5	548,87	2172,4	2721,3	1,6407	5,3801	7,0208
0,300	133,55	0,001073	0,6058	561,13	1982,4	2543,6	561,45	2163,9	2725,3	1,6717	5,3201	6,9918
0,325	136,30	0,001076	0,5620	572,88	1973,5	2546,3	573,23	2155,8	2729,0	1,7005	5,2646	6,9651
0,350	138,88	0,001079	0,5243	583,93	1965,0	2548,9	584,31	2148,1	2732,4	1,7274	5,2130	6,9404
0,375	141,32	0,001081	0,4914	594,38	1956,9	2551,3	594,79	2140,8	2735,6	1,7527	5,1647	6,9174
0,40	143,63	0,001084	0,4625	604,29	1949,3	2553,6	604,73	2133,8	2738,5	1,7766	5,1193	6,8958
0,45	147,93	0,001088	0,4140	622,75	1934,9	2557,6	623,24	2120,7	2743,9	1,8206	5,0359	6,8565
0,50	151,86	0,001093	0,3749	639,66	1921,6	2561,2	640,21	2108,5	2748,7	1,8606	4,9606	6,8212
0,55	155,48	0,001097	0,3427	655,30	1909,2	2564,5	655,91	2097,0	2752,9	1,8972	4,8920	6,7892
0,60	158,85	0,001101	0,3157	669,88	1897,5	2567,4	670,54	2086,3	2756,8	1,9311	4,8289	6,7600
0,65	162,01	0,001104	0,2927	683,55	1886,5	2570,1	684,26	2076,0	2760,3	1,9627	4,7704	6,7330
0,70	164,97	0,001108	0,2729	696,43	1876,1	2572,5	697,20	2066,3	2763,5	1,9922	4,7158	6,7080
0,75	167,77	0,001111	0,2556	708,62	1866,1	2574,7	709,45	2057,0	2766,4	2,0199	4,6647	6,6846
0,80	170,43	0,001115	0,2404	720,20	1856,6	2576,8	721,10	2048,0	2769,1	2,0461	4,6166	6,6627
0,85	172,96	0,001118	0,2270	731,25	1847,4	2578,7	732,20	2039,4	2771,6	2,0709	4,5711	6,6421
0,90	175,38	0,001121	0,2150	741,81	1838,7	2580,5	742,82	2031,1	2773,9	2,0946	4,5280	6,6225
0,95	177,69	0,001124	0,2042	751,94	1830,2	2582,1	753,00	2023,1	2776,1	2,1171	4,4869	6,6040
1,00	179,91	0,001127	0,19444	761,67	1822,0	2583,6	762,79	2015,3	2778,1	2,1386	4,4478	6,5864

Tabela A.1.2 (Continuação) — Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão MPa <i>p</i>	Temp. °C <i>T</i>	Volume específico m³/kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido sat. <i>v_f</i>	Vapor sat. <i>v_g</i>	Líquido sat. <i>u_f</i>	Evap. <i>u_{fg}</i>	Vapor sat. <i>u_g</i>	Líquido sat. <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Vapor sat. <i>h_g</i>	Líquido sat. <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Vapor sat. <i>s_g</i>
1,10	184,09	0,001133	0,17753	780,08	1806,3	2586,4	781,32	2000,4	2781,7	2,1791	4,3744	6,5535
1,20	187,99	0,001139	0,16333	797,27	1791,6	2588,8	798,64	1986,2	2784,8	2,2165	4,3067	6,5233
1,30	191,64	0,001144	0,15125	813,42	1777,5	2590,9	814,91	1972,7	2787,6	2,2514	4,2438	6,4953
1,40	195,07	0,001149	0,14084	828,68	1764,1	2592,8	830,29	1959,7	2790,0	2,2842	4,1850	6,4692
1,50	198,32	0,001154	0,13177	843,14	1751,3	2594,5	844,87	1947,3	2792,1	2,3150	4,1298	6,4448
1,75	205,76	0,001166	0,11349	876,44	1721,4	2597,8	878,48	1918,0	2796,4	2,3851	4,0044	6,3895
2,00	212,42	0,001177	0,09963	906,42	1693,8	2600,3	908,77	1890,7	2799,5	2,4473	3,8935	6,3408
2,25	218,45	0,001187	0,08875	933,81	1668,2	2602,0	936,48	1865,2	2801,7	2,5034	3,7938	6,2971
2,50	223,99	0,001197	0,07998	959,09	1644,0	2603,1	962,09	1841,0	2803,1	2,5546	3,7028	6,2574
2,75	229,12	0,001207	0,07275	982,65	1621,2	2603,8	985,97	1817,9	2803,9	2,6018	3,6190	6,2208
3,00	233,90	0,001216	0,06668	1004,76	1599,3	2604,1	1008,41	1795,7	2804,1	2,6456	3,5412	6,1869
3,25	238,38	0,001226	0,06152	1025,62	1578,4	2604,0	1029,60	1774,4	2804,0	2,6866	3,4685	6,1551
3,50	242,60	0,001235	0,05707	1045,41	1558,3	2603,7	1049,73	1753,7	2803,4	2,7252	3,4000	6,1252
4,0	250,40	0,001252	0,049778	1082,28	1520,0	2602,3	1087,29	1714,1	2801,4	2,7963	3,2737	6,0700
5,0	263,99	0,001286	0,039441	1147,78	1449,3	2597,1	1154,21	1640,1	2794,3	2,9201	3,0532	5,9733
6,0	275,64	0,001319	0,032440	1205,41	1384,3	2589,7	1213,32	1571,0	2784,3	3,0266	2,8625	5,8891
7,0	285,88	0,001351	0,027370	1257,51	1323,0	2580,5	1266,97	1505,1	2772,1	3,1210	2,6922	5,8132
8,0	295,06	0,001384	0,023518	1305,54	1264,3	2569,8	1316,61	1441,3	2757,9	3,2067	2,5365	5,7431
9,0	303,40	0,001418	0,020484	1350,47	1207,3	2557,8	1363,23	1378,9	2742,1	3,2857	2,3915	5,6771
10,0	311,06	0,001452	0,018026	1393,00	1151,4	2544,4	1407,53	1317,1	2724,7	3,3595	2,2545	5,6140
11,0	318,15	0,001489	0,015987	1433,68	1056,1	2529,7	1450,05	1255,5	2705,6	3,4294	2,1233	5,5527
12,0	324,75	0,001527	0,014263	1472,92	1040,8	2513,7	1491,24	1193,6	2684,8	3,4961	1,9962	5,4923
13,0	330,93	0,001567	0,012780	1511,09	985,0	2496,1	1531,46	1130,8	2662,2	3,5604	1,8718	5,4323
14,0	336,75	0,001611	0,011485	1548,53	928,2	2476,8	1571,08	1066,5	2637,5	3,6231	1,7485	5,3716
15,0	342,24	0,001658	0,010338	1585,58	869,8	2455,4	1610,45	1000,0	2610,5	3,6847	1,6250	5,3097
16,0	347,43	0,001711	0,009306	1622,63	809,1	2431,7	1650,00	930,6	2580,6	3,7460	1,4995	5,2454
17,0	352,37	0,001770	0,008365	1660,16	744,8	2405,0	1690,25	856,9	2547,2	3,8078	1,3698	5,1776
18,0	357,06	0,001840	0,007490	1698,86	675,4	2374,3	1731,97	777,1	2509,1	3,8713	1,2330	5,1044
19,0	361,54	0,001924	0,006657	1739,87	598,2	2338,1	1776,43	688,1	2464,5	3,9387	1,0841	5,0227
20,0	365,81	0,002035	0,005834	1785,47	507,6	2293,1	1826,18	583,6	2409,7	4,0137	0,9132	4,9269
21,0	369,89	0,002206	0,004953	1841,97	388,7	2230,7	1888,30	446,4	2334,7	4,1073	0,6942	4,8015
22,0	373,80	0,002808	0,003526	1973,16	108,2	2081,4	2034,92	124,0	2159,0	4,3307	0,1917	4,5224
22,09	374,14	0,003155	0,003155	2029,58	0,0	2029,6	2099,26	0,0	2099,3	4,4297	0,0000	4,4297

Tabela A.1.3 — Vapor d'água superaquecido (as unidades são as mesmas da Tabela anterior)

<i>T</i>	<i>p</i> = 10 kPa (45,81)				<i>p</i> = 50 kPa (81,33)				<i>p</i> = 100 kPa (99,62)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	14,674	2437,9	2584,6	8,1501	3,240	2483,8	2645,9	7,5939	1,6940	2506,1	2675,5	7,3593
50	14,869	2443,9	2592,6	8,1749	—	—	—	—	—	—	—	—
100	17,196	2515,5	2687,5	8,4479	3,418	2511,6	2682,5	7,6947	1,6958	2506,6	2676,2	7,3614
150	19,513	2587,9	2783,0	8,6881	3,889	2585,6	2780,1	7,9400	1,9364	2582,7	2776,4	7,6133
200	21,825	2661,3	2879,5	8,9037	4,356	2659,8	2877,6	8,1579	2,1723	2658,0	2875,3	7,8342
250	24,136	2736,0	2977,3	9,1002	4,821	2735,0	2976,0	8,3555	2,4060	2733,7	2974,3	8,0332
300	26,445	2812,1	3076,5	9,2812	5,284	2811,3	3075,5	8,5372	2,6388	2810,4	3074,3	8,2157
400	31,063	2968,9	3279,5	9,6076	6,209	2968,4	3278,9	8,8641	3,1026	2967,8	3278,1	8,5434
500	35,679	3132,3	3489,0	9,8977	7,134	3131,9	3488,6	9,1545	3,5655	3131,5	3488,1	8,8341
600	40,295	3302,5	3705,4	10,1608	8,058	3302,2	3705,1	9,4177	4,0278	3301,9	3704,7	9,0975
700	44,911	3479,6	3928,7	10,4028	8,981	3479,5	3928,5	9,6599	4,4899	3479,2	3928,2	9,3398
800	49,526	3663,8	4159,1	10,6281	9,904	3663,7	4158,9	9,8852	4,9517	3663,5	4158,7	9,5652
900	54,141	3855,0	4396,4	10,8395	10,828	3854,9	4396,3	10,0967	5,4135	3854,8	4396,1	9,7767
1000	58,757	4053,0	4640,6	11,0392	11,751	4052,9	4640,5	10,2964	5,8753	4052,8	4640,3	9,9764
1100	63,372	4257,5	4891,2	11,2287	12,674	4257,4	4891,1	10,4858	6,3370	4257,3	4890,9	10,1658
1200	67,987	4467,9	5147,8	11,4090	13,597	4467,8	5147,7	10,6662	6,7986	4467,7	5147,6	10,3462
1300	72,603	4683,7	5409,7	11,5810	14,521	4683,6	5409,6	10,8382	7,2603	4683,5	5409,5	10,5182
<i>T</i>	<i>p</i> = 200 kPa (120,23)				<i>p</i> = 300 kPa (133,55)				<i>p</i> = 400 kPa (143,63)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,88573	2529,5	2706,6	7,1271	0,60582	2543,6	2725,3	6,9918	0,46246	2553,6	2738,5	6,8958
150	0,95964	2576,9	2768,8	7,2795	0,63388	2570,8	2761,0	7,0778	0,47084	2564,5	2752,8	6,9299
200	1,08034	2654,4	2870,5	7,5066	0,71629	2650,7	2865,5	7,3115	0,53422	2646,8	2860,5	7,1706
250	1,19880	2731,2	2971,0	7,7085	0,79636	2728,7	2967,6	7,5165	0,59512	2726,1	2964,2	7,3788
300	1,31616	2808,6	3071,8	7,8926	0,87529	2806,7	3069,3	7,7022	0,65484	2804,8	3066,7	7,5661
400	1,54930	2966,7	3276,5	8,2217	1,03151	2965,5	3275,0	8,0329	0,77262	2964,4	3273,4	7,8984
500	1,78139	3130,7	3487,0	8,5132	1,18669	3130,0	3486,0	8,3250	0,88934	3129,2	3484,9	8,1912
600	2,01297	3301,4	3704,0	8,7769	1,34136	3300,8	3703,2	8,5892	1,00555	3300,2	3702,4	8,4557
700	2,24426	3478,8	3927,7	9,0194	1,49573	3478,4	3927,1	8,8319	1,12147	3477,9	3926,5	8,6987
800	2,47539	3663,2	4158,3	9,2450	1,64994	3662,9	4157,8	9,0575	1,23722	3662,5	4157,4	8,9244
900	2,70643	3854,5	4395,8	9,4565	1,80406	3854,2	4395,4	9,2691	1,35288	3853,9	4395,1	9,1361
1000	2,93740	4052,5	4640,0	9,6563	1,95812	4052,3	4639,7	9,4689	1,46847	4052,0	4639,4	9,3360
1100	3,16834	4257,0	4890,7	9,8458	2,11214	4256,8	4890,4	9,6585	1,58404	4256,5	4890,1	9,5255
1200	3,39927	4467,5	5147,3	10,0262	2,26614	4467,2	5147,1	9,8389	1,69958	4467,0	5146,8	9,7059
1300	3,63018	4683,2	5409,3	10,1982	2,42013	4683,0	5409,0	10,0109	1,81511	4682,8	5408,8	9,8780
<i>T</i>	<i>p</i> = 500 kPa (151,86)				<i>p</i> = 600 kPa (158,85)				<i>p</i> = 800 kPa (170,43)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,37489	2561,2	2748,7	6,8212	0,31567	2567,4	2756,8	6,7600	0,24043	2576,8	2769,1	6,6627
200	0,42492	2642,9	2855,4	7,0592	0,35202	2638,9	2850,1	6,9665	0,26080	2630,6	2839,2	6,8158
250	0,47436	2723,5	2960,7	7,2708	0,39383	2720,9	2957,2	7,1816	0,29314	2715,5	2950,0	7,0384
300	0,52256	2802,9	3064,2	7,4598	0,43437	2801,0	3061,6	7,3723	0,32411	2797,1	3056,4	7,2327
350	0,57012	2882,6	3167,6	7,6328	0,47424	2881,1	3165,7	7,5463	0,35439	2878,2	3161,7	7,4088
400	0,61728	2963,2	3271,8	7,7937	0,51372	2962,0	3270,2	7,7078	0,38426	2959,7	3267,1	7,5715
500	0,71093	3128,4	3483,8	8,0872	0,59199	3127,6	3482,7	8,0020	0,44331	3125,9	3480,6	7,8672
600	0,80406	3299,6	3701,7	8,3521	0,66974	3299,1	3700,9	8,2673	0,50184	3297,9	3699,4	8,1332
700	0,89691	3477,5	3926,0	8,5952	0,74720	3477,1	3925,4	8,5107	0,56007	3476,2	3924,3	8,3770
800	0,98959	3662,2	4157,0	8,8211	0,82450	3661,8	4156,5	8,7367	0,61813	3661,1	4155,7	8,6033
900	1,08217	3853,6	4394,7	9,0329	0,90169	3853,3	4394,4	8,9485	0,67610	3852,8	4393,6	8,8153
1000	1,17469	4051,8	4639,1	9,2328	0,97883	4051,5	4638,8	9,1484	0,73401	4051,0	4638,2	9,0153

Tabela A.1.3 (Continuação) — Vapor d'água superaquecido

<i>T</i>	<i>p</i> = 500 kPa (151,86)				<i>p</i> = 600 kPa (158,85)				<i>p</i> = 800 kPa (170,43)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
1100	1,26718	4256,3	4889,9	9,4224	1,05594	4256,1	4889,6	9,3381	0,79188	4255,6	4889,1	9,2049
1200	1,35964	4466,8	5146,6	9,6028	1,13302	4466,5	5146,3	9,5185	0,84974	4466,1	5145,8	9,3854
1300	1,45210	4682,5	5408,6	9,7749	1,21009	4682,3	5408,3	9,6906	0,90758	4681,8	5407,9	9,5575
<i>T</i>	<i>p</i> = 1,00 MPa (179,91)				<i>p</i> = 1,20 MPa (187,99)				<i>p</i> = 1,40 MPa (195,07)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,19444	2583,6	2778,1	6,5864	0,16333	2588,8	2784,8	6,5233	0,14084	2592,8	2790,0	6,4692
200	0,20596	2621,9	2827,9	6,6939	0,16930	2612,7	2815,9	6,5898	0,14302	2603,1	2803,3	6,4975
250	0,23268	2709,9	2942,6	6,9246	0,19235	2704,2	2935,0	6,8293	0,16350	2698,3	2927,2	6,7467
300	0,25794	2793,2	3051,2	7,1228	0,21382	2789,2	3045,8	7,0316	0,18228	2785,2	3040,4	6,9533
350	0,28247	2875,2	3157,7	7,3010	0,23452	2872,2	3153,6	7,2120	0,20026	2869,1	3149,5	7,1359
400	0,30659	2957,3	3263,9	7,4650	0,25480	2954,9	3260,7	7,3773	0,21780	2952,5	3257,4	7,3025
500	0,35411	3124,3	3478,4	7,7621	0,29463	3122,7	3476,3	7,6758	0,25215	3121,1	3474,1	7,6026
600	0,40109	3296,8	3697,9	8,0289	0,33393	3295,6	3696,3	7,9434	0,28596	3294,4	3694,8	7,8710
700	0,44779	3475,4	3923,1	8,2731	0,37294	3474,5	3922,0	8,1881	0,31947	3473,6	3920,9	8,1160
800	0,49432	3660,5	4154,8	8,4996	0,41177	3659,8	4153,9	8,4149	0,35281	3659,1	4153,0	8,3431
900	0,54075	3852,2	4392,9	8,7118	0,45051	3851,6	4392,2	8,6272	0,38606	3851,0	4391,5	8,5555
1000	0,58712	4050,5	4637,6	8,9119	0,48919	4050,0	4637,0	8,8274	0,41924	4049,5	4636,4	8,7558
1100	0,63345	4255,1	4888,5	9,1016	0,52783	4254,6	4888,0	9,0171	0,45239	4254,1	4887,5	8,9456
1200	0,67977	4465,6	5145,4	9,2821	0,56646	4465,1	5144,9	9,1977	0,48552	4464,6	5144,4	9,1262
1300	0,72608	4681,3	5407,4	9,4542	0,60507	4680,9	5406,9	9,3698	0,51864	4680,4	5406,5	9,2983
<i>T</i>	<i>p</i> = 1,60 MPa (201,40)				<i>p</i> = 1,80 MPa (207,15)				<i>p</i> = 2,00 MPa (212,42)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,12380	2595,9	2794,0	6,4217	0,11042	2598,4	2797,1	6,3793	0,09963	2600,3	2799,5	6,3408
225	0,13287	2644,6	2857,2	6,5518	0,11673	2636,6	2846,7	6,4807	0,10377	2628,3	2835,8	6,4146
250	0,14184	2692,3	2919,2	6,6732	0,12497	2686,0	2911,0	6,6066	0,11144	2679,6	2902,5	6,5452
300	0,15862	2781,0	3034,8	6,8844	0,14021	2776,8	3029,2	6,8226	0,12547	2772,6	3023,5	6,7663
350	0,17456	2866,0	3145,4	7,0693	0,15457	2862,9	3141,2	7,0099	0,13857	2859,8	3137,0	6,9562
400	0,19005	2950,1	3254,2	7,2373	0,16847	2947,7	3250,9	7,1793	0,15120	2945,2	3247,6	7,1270
500	0,22029	3119,5	3471,9	7,5389	0,19550	3117,8	3469,7	7,4824	0,17568	3116,2	3467,6	7,4316
600	0,24998	3293,3	3693,2	7,8080	0,22199	3292,1	3691,7	7,7523	0,19960	3290,9	3690,1	7,7023
700	0,27937	3472,7	3919,7	8,0535	0,24818	3471,9	3918,6	7,9983	0,22323	3471,0	3917,5	7,9487
800	0,30859	3658,4	4152,1	8,2808	0,27420	3657,7	4151,3	8,2258	0,24668	3657,0	4150,4	8,1766
900	0,33772	3850,5	4390,8	8,4934	0,30012	3849,9	4390,1	8,4386	0,27004	3849,3	4389,4	8,3895
1000	0,36678	4049,0	4635,8	8,6938	0,32598	4048,4	4635,2	8,6390	0,29333	4047,9	4634,6	8,5900
1100	0,39581	4253,7	4887,0	8,8837	0,35180	4253,2	4886,4	8,8290	0,31659	4252,7	4885,9	8,7800
1200	0,42482	4464,2	5143,9	9,0642	0,37761	4463,7	5143,4	9,0096	0,33984	4463,2	5142,9	8,9606
1300	0,45382	4679,9	5406,0	9,2364	0,40340	4679,4	5405,6	9,1817	0,36306	4679,0	5405,1	9,1328
<i>T</i>	<i>p</i> = 2,50 MPa (223,99)				<i>p</i> = 3,00 MPa (233,90)				<i>p</i> = 3,50 MPa (242,60)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,07998	2603,1	2803,1	6,2574	0,06668	2604,1	2804,1	6,1869	0,05707	2603,7	2803,4	6,1252
225	0,08027	2605,6	2806,3	6,2638	—	—	—	—	—	—	—	—
250	0,08700	2662,5	2880,1	6,4084	0,07058	2644,0	2855,8	6,2871	0,05873	2623,7	2829,2	6,1748
300	0,09890	2761,6	3008,8	6,6437	0,08114	2750,0	2993,5	6,5389	0,06842	2738,0	2977,5	6,4460
350	0,10976	2851,8	3126,2	6,8402	0,09053	2843,7	3115,3	6,7427	0,07678	2835,3	3104,0	6,6578
400	0,12010	2939,0	3239,3	7,0147	0,09936	2932,7	3230,8	6,9211	0,08453	2926,4	3222,2	6,8404
450	0,13014	3025,4	3350,8	7,1745	0,10787	3020,4	3344,0	7,0833	0,09196	3015,3	3337,2	7,0051
500	0,13998	3112,1	3462,0	7,3233	0,11619	3107,9	3456,5	7,2337	0,09918	3103,7	3450,9	7,1571
600	0,15930	3288,0	3686,2	7,5960	0,13243	3285,0	3682,3	7,5084	0,11324	3282,1	3678,4	7,4338

Tabela A.1.3 (Continuação) — Vapor d'água superaquecido

<i>T</i>	<i>p</i> = 2,50 MPa (223,99)				<i>p</i> = 3,00 MPa (233,90)				<i>p</i> = 3,50 MPa (242,60)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
700	0,17832	3468,8	3914,6	7,8435	0,14838	3466,6	3911,7	7,7571	0,12699	3464,4	3908,8	7,6837
800	0,19716	3655,3	4148,2	8,0720	0,16414	3653,6	4146,0	7,9862	0,14056	3651,8	4143,8	7,9135
900	0,21590	3847,9	4387,6	8,2853	0,17980	3846,5	4385,9	8,1999	0,15402	3845,0	4384,1	8,1275
1000	0,23458	4046,7	4633,1	8,4860	0,19541	4045,4	4631,6	8,4009	0,16743	4044,1	4630,1	8,3288
1100	0,25322	4251,5	4884,6	8,6761	0,21098	4250,3	4883,3	8,5911	0,18080	4249,1	4881,9	8,5191
1200	0,27185	4462,1	5141,7	8,8569	0,22652	4460,9	5140,5	8,7719	0,19415	4459,8	5139,3	8,7000
1300	0,29046	4677,8	5404,0	9,0291	0,24206	4676,6	5402,8	8,9442	0,20749	4675,5	5401,7	8,8723
<i>T</i>	<i>p</i> = 4,00 MPa (250,40)				<i>p</i> = 4,50 MPa (257,48)				<i>p</i> = 5,00 MPa (263,99)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,04978	2602,3	2801,4	6,0700	0,04406	2600,0	2798,3	6,0198	0,03944	2597,1	2794,3	5,9733
275	0,05457	2667,9	2886,2	6,2284	0,04730	2650,3	2863,1	6,1401	0,04141	2631,2	2838,3	6,0543
300	0,05884	2725,3	2960,7	6,3614	0,05135	2712,0	2943,1	6,2827	0,04532	2697,9	2924,5	6,2083
350	0,06645	2826,6	3092,4	6,5820	0,05840	2817,8	3080,6	6,5130	0,05194	2808,7	3068,4	6,4492
400	0,07341	2919,9	3213,5	6,7689	0,06475	2913,3	3204,7	6,7046	0,05781	2906,6	3195,6	6,6458
450	0,08003	3010,1	3330,2	6,9362	0,07074	3004,9	3323,2	6,8745	0,06330	2999,6	3316,1	6,8185
500	0,08643	3099,5	3445,2	7,0900	0,07651	3095,2	3439,5	7,0300	0,06857	3090,9	3433,8	6,9758
600	0,09885	3279,1	3674,4	7,3688	0,08765	3276,0	3670,5	7,3109	0,07869	3273,0	3666,5	7,2588
700	0,11095	3462,1	3905,9	7,6198	0,09847	3459,9	3903,0	7,5631	0,08849	3457,7	3900,1	7,5122
800	0,12287	3650,1	4141,6	7,8502	0,10911	3648,4	4139,4	7,7942	0,09811	3646,6	4137,2	7,7440
900	0,13469	3843,6	4382,3	8,0647	0,11965	3842,1	4380,6	8,0091	0,10762	3840,7	4378,8	7,9593
1000	0,14645	4042,9	4628,7	8,2661	0,13013	4041,6	4627,2	8,2108	0,11707	4040,3	4625,7	8,1612
1100	0,15817	4248,0	4880,6	8,4566	0,14056	4246,8	4879,3	8,4014	0,12648	4245,6	4878,0	8,3519
1200	0,16987	4458,6	5138,1	8,6376	0,15098	4457,4	5136,9	8,5824	0,13587	4456,3	5135,7	8,5330
1300	0,18156	4674,3	5400,5	8,8099	0,16139	4673,1	5399,4	8,7548	0,14526	4672,0	5398,2	8,7055
<i>T</i>	<i>p</i> = 6,00 MPa (275,64)				<i>p</i> = 7,00 MPa (285,88)				<i>p</i> = 8,00 MPa (295,06)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,03244	2589,7	2784,3	5,8891	0,02737	2580,5	2772,1	5,8132	0,02352	2569,8	2757,9	5,7431
300	0,03616	2667,2	2884,2	6,0673	0,02947	2632,1	2838,4	5,9304	0,02426	2590,9	2785,0	5,7905
350	0,04223	2789,6	3043,0	6,3334	0,03524	2769,3	3016,0	6,2282	0,02995	2747,7	2987,3	6,1300
400	0,04739	2892,8	3177,2	6,5407	0,03993	2878,6	3158,1	6,4477	0,03432	2863,8	3138,3	6,3633
450	0,05214	2988,9	3301,8	6,7192	0,04416	2977,9	3287,0	6,6326	0,03817	2966,7	3272,0	6,5550
500	0,05665	3082,2	3422,1	6,8802	0,04814	3073,3	3410,3	6,7974	0,04175	3064,3	3398,3	6,7239
550	0,06101	3174,6	3540,6	7,0287	0,05195	3167,2	3530,9	6,9486	0,04516	3159,8	3521,0	6,8778
600	0,06525	3266,9	3658,4	7,1676	0,05565	3260,7	3650,3	7,0894	0,04845	3254,4	3642,0	7,0205
700	0,07352	3453,2	3894,3	7,4234	0,06283	3448,6	3888,4	7,3476	0,05481	3444,0	3882,5	7,2812
800	0,08160	3643,1	4132,7	7,6566	0,06981	3639,6	4128,3	7,5822	0,06097	3636,1	4123,8	7,5173
900	0,08958	3837,8	4375,3	7,8727	0,07669	3835,0	4371,8	7,7991	0,06702	3832,1	4368,3	7,7350
1000	0,09749	4037,8	4622,7	8,0751	0,08350	4035,3	4619,8	8,0020	0,07301	4032,8	4616,9	7,9384
1100	0,10536	4243,3	4875,4	8,2661	0,09027	4240,9	4872,8	8,1933	0,07896	4238,6	4870,3	8,1299
1200	0,11321	4454,0	5133,3	8,4473	0,09703	4451,7	5130,9	8,3747	0,08489	4449,4	5128,5	8,3115
1300	0,12106	4669,6	5396,0	8,6199	0,10377	4667,3	5393,7	8,5472	0,09080	4665,0	5391,5	8,4842
<i>T</i>	<i>p</i> = 9,00 MPa (303,40)				<i>p</i> = 10,00 MPa (311,06)				<i>p</i> = 12,50 MPa (327,89)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,02048	2557,8	2742,1	5,6771	0,01803	2544,4	2724,7	5,6140	0,01350	2505,1	2673,8	5,4623
325	0,02327	2646,5	2855,9	5,8711	0,01986	2610,4	2809,0	5,7568	—	—	—	—
350	0,02580	2724,4	2956,5	6,0361	0,02242	2699,2	2923,4	5,9442	0,01613	2624,6	2826,2	5,7117
400	0,02993	2848,4	3117,8	6,2853	0,02641	2832,4	3096,5	6,2119	0,02000	2789,3	3039,3	6,0416
450	0,03350	2955,1	3256,6	6,4843	0,02975	2943,3	3240,8	6,4189	0,02299	2912,4	3199,8	6,2718

Tabela A.1.3 (Continuação) — Vapor d'água superaquecido

<i>T</i>	<i>p</i> = 9,00 MPa (303,40)				<i>p</i> = 10,00 MPa (311,06)				<i>p</i> = 12,50 MPa (327,89)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
500	0,03677	3055,1	3386,1	6,6575	0,03279	3045,8	3373,6	6,5965	0,02560	3021,7	3341,7	6,4617
550	0,03987	3152,2	3511,0	6,8141	0,03564	3144,5	3500,9	6,7561	0,02801	3124,9	3475,1	6,6289
600	0,04285	3248,1	3633,7	6,9588	0,03837	3241,7	3625,3	6,9028	0,03029	3225,4	3604,0	6,7810
650	0,04574	3343,7	3755,3	7,0943	0,04101	3338,2	3748,3	7,0397	0,03248	3324,4	3730,4	6,9218
700	0,04857	3439,4	3876,5	7,2221	0,04358	3434,7	3870,5	7,1687	0,03460	3422,9	3855,4	7,0536
800	0,05409	3632,5	4119,4	7,4597	0,04859	3629,0	4114,9	7,4077	0,03869	3620,0	4103,7	7,2965
900	0,05950	3829,2	4364,7	7,6782	0,05349	3826,3	4361,2	7,6272	0,04267	3819,1	4352,5	7,5181
1000	0,06485	4030,3	4613,9	7,8821	0,05832	4027,8	4611,0	7,8315	0,04658	4021,6	4603,8	7,7237
1100	0,07016	4236,3	4867,7	8,0739	0,06312	4234,0	4865,1	8,0236	0,05045	4228,2	4858,8	7,9165
1200	0,07544	4447,2	5126,2	8,2556	0,06789	4444,9	5123,8	8,2054	0,05430	4439,3	5118,0	8,0987
1300	0,08072	4662,7	5389,2	8,4283	0,07265	4660,4	5387,0	8,3783	0,05813	4654,8	5381,4	8,2717
<i>T</i>	<i>p</i> = 15 MPa (342,24)				<i>p</i> = 17,5 MPa (354,75)				<i>p</i> = 20 MPa (365,81)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	,010338	2455,4	2610,5	5,3097	,0079204	2390,2	2528,8	5,1418	,0058342	2293,1	2409,7	4,9269
350	,011470	2520,4	2692,4	5,4420	—	—	—	—	—	—	—	—
400	,015649	2740,7	2975,4	5,8810	,0124477	2685,0	2902,8	5,7212	,0099423	2619,2	2818,1	5,5539
450	,018446	2879,5	3156,2	6,1403	,0151740	2844,2	3109,7	6,0182	,0126953	2806,2	3060,1	5,9016
500	,020800	2996,5	3308,5	6,3442	,0173585	2970,3	3274,0	6,2382	,0147683	2942,8	3238,2	6,1400
550	,022927	3104,7	3448,6	6,5198	,0192877	3083,8	3421,4	6,4229	,0165553	3062,3	3393,5	6,3347
600	,024911	3208,6	3582,3	6,6775	,0210640	3191,5	3560,1	6,5866	,0181781	3174,0	3537,6	6,5048
650	,026797	3310,4	3712,3	6,8223	,0227372	3296,0	3693,9	6,7356	,0196929	3281,5	3675,3	6,6582
700	,028612	3410,9	3840,1	6,9572	,0243365	3398,8	3824,7	6,8736	,0211311	3386,5	3809,1	6,7993
800	,032096	3611,0	4092,4	7,2040	,0273849	3601,9	4081,1	7,1245	,0238532	3592,7	4069,8	7,0544
900	,035457	3811,9	4343,8	7,4279	,0303071	3804,7	4335,1	7,3507	,0264463	3797,4	4326,4	7,2830
1000	,038748	4015,4	4596,6	7,6347	,0331580	4009,3	4589,5	7,5588	,0289666	4003,1	4582,5	7,4925
1100	,042001	4222,6	4852,6	7,8282	,0359695	4216,9	4846,4	7,7530	,0314471	4211,3	4840,2	7,6874
1200	,045233	4433,8	5112,3	8,0108	,0387605	4428,3	5106,6	7,9359	,0339071	4422,8	5101,0	7,8706
1300	,048455	4649,1	5375,9	8,1839	,0415417	4643,5	5370,5	8,1093	,0363574	4638,0	5365,1	8,0441
<i>T</i>	<i>p</i> = 25 MPa				<i>p</i> = 30 MPa				<i>p</i> = 35 MPa			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
375	,001973	1798,6	1847,9	4,0319	,001789	1737,8	1791,4	3,9303	,001700	1702,9	1762,4	3,8721
400	,006004	2430,1	2580,2	5,1418	,002790	2067,3	2151,0	4,4728	,002100	1914,0	1987,5	4,2124
425	,007882	2609,2	2806,3	5,4722	,005304	2455,1	2614,2	5,1503	,003428	2253,4	2373,4	4,7747
450	,009162	2720,7	2949,7	5,6743	,006735	2619,3	2821,4	5,4423	,004962	2498,7	2672,4	5,1962
500	,011124	2884,3	3162,4	5,9592	,008679	2820,7	3081,0	5,7904	,006927	2751,9	2994,3	5,6281
550	,012724	3017,5	3335,6	6,1764	,010168	2970,3	3275,4	6,0342	,008345	2920,9	3213,0	5,9025
600	,014138	3137,9	3491,4	6,3602	,011446	3100,5	3443,9	6,2330	,009527	3062,0	3395,5	6,1178
650	,015433	3251,6	3637,5	6,5229	,012596	3221,0	3598,9	6,4057	,010575	3189,8	3559,9	6,3010
700	,016647	3361,4	3777,6	6,6707	,013661	3335,8	3745,7	6,5606	,011533	3309,9	3713,5	6,4631
800	,018913	3574,3	4047,1	6,9345	,015623	3555,6	4024,3	6,8332	,013278	3536,8	4001,5	6,7450
900	,021045	3783,0	4309,1	7,1679	,017448	3768,5	4291,9	7,0717	,014883	3754,0	4274,9	6,9886
1000	,023102	3990,9	4568,5	7,3801	,019196	3978,8	4554,7	7,2867	,016410	3966,7	4541,1	7,2063
1100	,025119	4200,2	4828,2	7,5765	,020903	4189,2	4816,3	7,4845	,017895	4178,3	4804,6	7,4056
1200	,027115	4412,0	5089,9	7,7604	,022589	4401,3	5079,0	7,6691	,019360	4390,7	5068,4	7,5910
1300	,029101	4626,9	5354,4	7,9342	,024266	4616,0	5344,0	7,8432	,020815	4605,1	5333,6	7,7652

Tabela A.1.3 (Continuação) — Vapor d'água superaquecido

<i>T</i>	<i>p</i> = 40 MPa				<i>p</i> = 50 MPa				<i>p</i> = 60 MPa			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
375	.0016406	1677,1	1742,7	3,8289	.0015593	1638,6	1716,5	3,7638	.0015027	1609,3	1699,5	3,7140
400	.0019077	1854,5	1930,8	4,1134	.0017309	1788,0	1874,6	4,0030	.0016335	1745,3	1843,4	3,9317
425	.0025319	2096,8	2198,1	4,5028	.0020071	1959,6	2060,0	4,2733	.0018165	1892,7	2001,7	4,1625
450	.0036931	2365,1	2512,8	4,9459	.0024862	2159,6	2283,9	4,5883	.0020850	2053,9	2179,0	4,4119
500	.0056225	2678,4	2903,3	5,4699	.0038924	2525,5	2720,1	5,1725	.0029557	2390,5	2567,9	4,9320
600	.0080943	3022,6	3346,4	6,0113	.0061123	2942,0	3247,6	5,8177	.0048345	2861,1	3151,2	5,6451
650	.0090636	3158,0	3520,6	6,2054	.0069657	3093,6	3441,8	6,0342	.0055953	3028,8	3364,6	5,8829
700	.0099415	3283,6	3681,3	6,3750	.0077274	3230,5	3616,9	6,2189	.0062719	3177,3	3553,6	6,0824
800	.0115228	3517,9	3978,8	6,6662	.0090761	3479,8	3933,6	6,5290	.0074588	3441,6	3889,1	6,4110
900	.0129626	3739,4	4257,9	6,9150	.0102831	3710,3	4224,4	6,7882	.0085083	3681,0	4191,5	6,6805
1000	.0143238	3954,6	4527,6	7,1356	.0114113	3930,5	4501,1	7,0146	.0094800	3906,4	4475,2	6,9126
1100	.0156426	4167,4	4793,1	7,3364	.0124966	4145,7	4770,6	7,2183	.0104091	4124,1	4748,6	7,1194
1200	.0169403	4380,1	5057,7	7,5224	.0135606	4359,1	5037,2	7,4058	.0113167	4338,2	5017,2	7,3082
1300	.0182292	4594,3	5323,5	7,6969	.0146159	4572,8	5303,6	7,5807	.0122155	4551,4	5284,3	7,4837

Tabela A.1.4 — Água líquida comprimida

<i>T</i>	<i>p</i> = 5,00 MPa (263,99)				<i>p</i> = 10,00 MPa (311,06)				<i>p</i> = <i>p</i> = 15 MPa (342,24)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	.0012859	1147,78	1154,21	2,9201	.0014524	1393,00	1401,53	3,3595	.0016581	1585,58	1610,45	3,6847
0	.0009977	0,03	5,02	0,0001	.0009952	0,10	10,05	0,0003	.0009928	0,15	15,04	0,0004
20	.0009995	83,64	88,64	0,2955	.0009972	83,35	93,32	0,2945	.0009950	83,05	97,97	0,2934
40	.0010056	166,93	171,95	0,5705	.0010034	166,33	176,36	0,5685	.0010013	165,73	180,75	0,5665
60	.0010149	250,21	255,28	0,8284	.0010127	249,34	259,47	0,8258	.0010105	248,49	263,65	0,8231
80	.0010268	333,69	338,83	1,0719	.0010245	332,56	342,81	1,0687	.0010222	331,46	346,79	1,0655
100	.0010410	417,50	422,71	1,3030	.0010385	416,09	426,48	1,2992	.0010361	414,72	430,26	1,2954
120	.0010576	501,79	507,07	1,5232	.0010549	500,07	510,61	1,5188	.0010522	498,39	514,17	1,5144
140	.0010768	586,74	592,13	1,7342	.0010737	584,67	595,40	1,7291	.0010707	582,64	598,70	1,7241
160	.0010988	672,61	678,10	1,9374	.0010953	670,11	681,07	1,9316	.0010918	667,69	684,07	1,9259
180	.0011240	759,62	765,24	2,1341	.0011199	756,63	767,83	2,1274	.0011159	753,74	770,48	2,1209
200	.0011530	848,08	853,85	2,3254	.0011480	844,49	855,97	2,3178	.0011433	841,04	858,18	2,3103
220	.0011866	938,43	944,36	2,5128	.0011805	934,07	945,88	2,5038	.0011748	929,89	947,52	2,4952
240	.0012264	1031,34	1037,47	2,6978	.0012187	1025,94	1038,13	2,6872	.0012114	1020,82	1038,99	2,6770
260	.0012748	1127,92	1134,30	2,8829	.0012645	1121,03	1133,68	2,8698	.0012550	1114,59	1133,41	2,8575
280	—	—	—	—	.0013216	1220,90	1234,11	3,0547	.0013084	1212,47	1232,09	3,0392
300	—	—	—	—	.0013972	1328,34	1342,31	3,2468	.0013770	1316,58	1337,23	3,2259
320	—	—	—	—	—	—	—	—	.0014724	1431,05	1453,13	3,4246
340	—	—	—	—	—	—	—	—	.0016311	1567,42	1591,88	3,6545
<i>T</i>	<i>p</i> = 20 MPa (365,81)				<i>p</i> = 30 MPa				<i>p</i> = 50 MPa			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	.0020353	1785,47	1826,18	4,0137	—	—	—	—	—	—	—	—
0	.0009904	0,20	20,00	0,0004	.0009856	0,25	29,82	0,0001	.0009766	0,20	49,03	−0,0014
20	.0009928	82,75	102,61	0,2922	.0009886	82,16	111,82	0,2898	.0009804	80,98	130,00	0,2847
40	.0009992	165,15	185,14	0,5646	.0009951	164,01	193,87	0,5606	.0009872	161,84	211,20	0,5526
60	.0010084	247,66	267,82	0,8205	.0010042	246,03	276,16	0,8153	.0009962	242,96	292,77	0,8051
80	.0010199	330,38	350,78	1,0623	.0010156	328,28	358,75	1,0561	.0010073	324,32	374,68	1,0439

Tabela A.1.4 (Continuação) — Água líquida comprimida

<i>T</i>	<i>p</i> = 20 MPa (365,81)				<i>p</i> = 30 MPa				<i>p</i> = 50 MPa			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
100	.0010337	413,37	434,04	1,2917	.0010290	410,76	441,63	1,2844	.0010201	405,86	456,87	1,2703
120	.0010496	496,75	517,74	1,5101	.0010445	493,58	524,91	1,5017	.0010348	487,63	539,37	1,4857
140	.0010678	580,67	602,03	1,7192	.0010621	576,86	608,73	1,7097	.0010515	569,76	622,33	1,6915
160	.0010885	665,34	687,11	1,9203	.0010821	660,81	693,27	1,9095	.0010703	652,39	705,91	1,8890
180	.0011120	750,94	773,18	2,1146	.0011047	745,57	778,71	2,1024	.0010912	735,68	790,24	2,0793
200	.0011387	837,70	860,47	2,3031	.0011302	831,34	865,24	2,2892	.0011146	819,73	875,46	2,2634
220	.0011693	925,89	949,27	2,4869	.0011590	918,32	953,09	2,4710	.0011408	904,67	961,71	2,4419
240	.0012046	1015,94	1040,04	2,6673	.0011920	1006,84	1042,60	2,6489	.0011702	990,69	1049,20	2,6158
260	.0012462	1108,53	1133,45	2,8459	.0012303	1097,38	1134,29	2,8242	.0012034	1078,06	1138,23	2,7860
280	.0012965	1204,69	1230,62	3,0248	.0012755	1190,69	1228,96	2,9985	.0012415	1167,19	1229,26	2,9536
300	.0013596	1306,10	1333,29	3,2071	.0013304	1287,89	1327,80	3,1740	.0012860	1258,66	1322,95	3,1200
320	.0014437	1415,66	1444,53	3,3978	.0013997	1390,64	1432,63	3,3538	.0013388	1353,23	1420,17	3,2867
340	.0015683	1539,64	1571,01	3,6074	.0014919	1501,71	1546,47	3,5425	.0014032	1451,91	1522,07	3,4556
360	.0018226	1702,78	1739,23	3,8770	.0016265	1626,57	1675,36	3,7492	.0014838	1555,97	1630,16	3,6290
380	—	—	—	—	.0018691	1781,35	1837,43	4,0010	.0015883	1667,13	1746,54	3,8100

Tabela A.1.5 — Saturação sólido - vapor

Temp. °C <i>T</i>	Pressão kPa <i>p</i>	Volume específico m³/kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Sólido sat. <i>v_s</i> × 10³	Vapor sat. <i>v_v</i>	Sólido sat. <i>u_s</i>	Subl. <i>u_{sw}</i>	Vapor sat. <i>u_v</i>	Sólido sat. <i>h_s</i>	Subl. <i>h_{sw}</i>	Vapor sat. <i>h_v</i>	Sólido sat. <i>s_s</i>	Subl. <i>s_{sw}</i>	Vapor sat. <i>s_v</i>
0,01	0,6113	1,0908	206,153	−333,40	2708,7	2375,3	−333,40	2834,7	2501,3	−1,2210	10,3772	9,1562
0	0,6108	1,0908	206,315	−333,42	2708,7	2375,3	−333,42	2834,8	2501,3	−1,2211	10,3776	9,1565
−2	0,5177	1,0905	241,663	−337,61	2710,2	2372,5	−337,61	2835,3	2497,6	−1,2369	10,4562	9,2193
−4	0,4376	1,0901	283,799	−341,78	2711,5	2369,8	−341,78	2835,7	2494,0	−1,2526	10,5358	9,2832
−6	0,3689	1,0898	334,139	−345,91	2712,9	2367,0	−345,91	2836,2	2490,3	−1,2683	10,6165	9,3482
−8	0,3102	1,0894	394,414	−350,02	2714,2	2364,2	−350,02	2836,6	2486,6	−1,2839	10,6982	9,4143
−10	0,2601	1,0891	466,757	−354,09	2715,5	2361,4	−354,09	2837,0	2482,9	−1,2995	10,7809	9,4815
−12	0,2176	1,0888	553,803	−358,14	2716,8	2358,7	−358,14	2837,3	2479,2	−1,3150	10,8648	9,5498
−14	0,1815	1,0884	658,824	−362,16	2718,0	2355,9	−362,16	2837,6	2475,5	−1,3306	10,9498	9,6192
−16	0,1510	1,0881	785,907	−366,14	2719,2	2353,1	−366,14	2837,9	2471,8	−1,3461	11,0359	9,6898
−18	0,1252	1,0878	940,183	−370,10	2720,4	2350,3	−370,10	2838,2	2468,1	−1,3617	11,1233	9,7616
−20	0,10355	1,0874	1128,113	−374,03	2721,6	2347,5	−374,03	2838,4	2464,3	−1,3772	11,2120	9,8348
−22	0,08535	1,0871	1357,864	−377,93	2722,7	2344,7	−377,93	2838,6	2460,6	−1,3928	11,3020	9,9093
−24	0,07012	1,0868	1639,753	−381,80	2723,7	2342,0	−381,80	2838,7	2456,9	−1,4083	11,3935	9,9852
−26	0,05741	1,0864	1986,776	−385,64	2724,8	2339,2	−385,64	2838,9	2453,2	−1,4239	11,4864	10,0625
−28	0,04684	1,0861	2415,201	−389,45	2725,8	2336,4	−389,45	2839,0	2449,5	−1,4394	11,5808	10,1413
−30	0,03810	1,0858	2945,228	−393,23	2726,8	2333,6	−393,23	2839,0	2445,8	−1,4550	11,6765	10,2215
−32	0,03090	1,0854	3601,823	−396,98	2727,8	2330,8	−396,98	2839,1	2442,1	−1,4705	11,7733	10,3028
−34	0,02499	1,0851	4416,253	−400,71	2728,7	2328,0	−400,71	2839,1	2438,4	−1,4860	11,8713	10,3853
−36	0,02016	1,0848	5430,116	−404,40	2729,6	2325,2	−404,40	2839,1	2434,7	−1,5014	11,9704	10,4690
−38	0,01618	1,0844	6707,022	−408,06	2730,5	2322,4	−408,06	2839,0	2431,0	−1,5168	12,0714	10,5546
−40	0,01286	1,0841	8366,396	−411,70	2731,3	2319,6	−411,70	2838,9	2427,2	−1,5321	12,1768	10,6447

Apêndice C

VIABILIDADE ECONÔMICA	Situação A
Custo Operacional	
Custo Anual de Cavaco de Madeira	28.512.000,00 R\$/ano
Custo Anual de Gás Natural	0,00 R\$/ano
Custo Anual das Águas	46.247,86 R\$/ano
Manutenção	3.456.000,00 R\$/ano
Custo Operacional TOTAL	32.014.247,86 R\$/ano
Investimentos	
Aquisição de Equipamentos	69.500.000,00 R\$
Investimento TOTAL	69.500.000,00 R\$

Tempo do Investimento anos

Financiamento

Valor Financiado R\$ 41.700.000,00

Juros

tempo amortização fina anos

ANÁLISE DO INVESTIMENTO

PERÍODO DE ANÁLISE	20 anos
TAXA DE DESCONTO	12% a.a.
INVESTIMENTO INICIAL	69.500.000,00 R\$
PAYBACK SIMPLES	anos
VPL	R\$ 39.628.254,61
TIR	31,18%

Apêndice C

Situação A	Anos:	1	2	3	4	5	6
Investimento	-R\$	69.500.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Financiamento	R\$	41.700.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Receita	R\$	-	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
Custos Operacionais	R\$	-	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86
Despesas (1% do inves)	R\$	-	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
Juros	R\$	-	-R\$ 1.459.500,00	-R\$ 1.362.200,00	-R\$ 1.264.900,00	-R\$ 1.167.600,00	-R\$ 1.070.300,00
LAIR / EBITDA	-R\$	27.800.000,00	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14
IR + CSSL (34%)	R\$	-	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73
Lucro Líquido	-R\$	27.800.000,00	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41
Amortização	R\$	-	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00
FCL Acionista	-R\$	27.800.000,00	R\$ 8.386.796,41	R\$ 8.484.096,41	R\$ 8.581.396,41	R\$ 8.678.696,41	R\$ 8.775.996,41

7	8	9	10	11	12	13
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
-R\$ 973.000,00	-R\$ 875.700,00	-R\$ 778.400,00	-R\$ 681.100,00	-R\$ 583.800,00	-R\$ 486.500,00	-R\$ 389.200,00
R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14
-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73
R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41
-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00
R\$ 8.873.296,41	R\$ 8.970.596,41	R\$ 9.067.896,41	R\$ 9.165.196,41	R\$ 9.262.496,41	R\$ 9.359.796,41	R\$ 9.457.096,41

14	15	16	17	18	19	20
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86	-R\$ 32.014.247,86
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
-R\$ 291.900,00	-R\$ 194.600,00	-R\$ 97.300,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14	R\$ 19.130.752,14
-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73	-R\$ 6.504.455,73
R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41
-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 9.554.396,41	R\$ 9.651.696,41	R\$ 9.748.996,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41	R\$ 12.626.296,41

Apêndice C

VIABILIDADE ECONÔMICA	Situação B
Custo Operacional	
Custo Anual de Cavaco de Madeira	24.278.400,00 R\$/ano
Custo Anual de Gás Natural	13.601.981,92 R\$/ano
Custo Anual das Águas	46.202,81 R\$/ano
Manutenção	3.456.000,00 R\$/ano
Custo Operacional TOTAL	41.382.584,73 R\$/ano
Investimentos	
Aquisição de Equipamentos	69.500.000,00 R\$
Investimento TOTAL	69.500.000,00 R\$

Tempo do Investimento anos

Financiamento

Valor Financiado R\$ 41.700.000,00

Juros

tempo amortização fina anos

ANÁLISE DO INVESTIMENTO

PERÍODO DE ANÁLISE	20 anos
TAXA DE DESCONTO	12% a.a.
INVESTIMENTO INICIAL	69.500.000,00 R\$
PAYBACK SIMPLES	anos
VPL	R\$ (5.915.097,51)
TIR	8,98%

Apêndice C

Situação B	Anos:	1	2	3	4	5	6
Investimento	-R\$	69.500.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Financiamento	R\$	41.700.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Receita	R\$	-	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
Custos Operacionais	R\$	-	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73
Despesas (1% do inves)	R\$	-	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
Juros	R\$	-	-R\$ 1.459.500,00	-R\$ 1.362.200,00	-R\$ 1.264.900,00	-R\$ 1.167.600,00	-R\$ 1.070.300,00
LAIR / EBITDA	-R\$	27.800.000,00	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27
IR + CSSL (34%)	R\$	-	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19
Lucro Líquido	-R\$	27.800.000,00	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07
Amortização	R\$	-	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00
FCL Acionista	-R\$	27.800.000,00	R\$ 2.203.694,07	R\$ 2.300.994,07	R\$ 2.398.294,07	R\$ 2.495.594,07	R\$ 2.592.894,07

7	8	9	10	11	12	13
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
-R\$ 973.000,00	-R\$ 875.700,00	-R\$ 778.400,00	-R\$ 681.100,00	-R\$ 583.800,00	-R\$ 486.500,00	-R\$ 389.200,00
R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27
-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19
R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07
-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00
R\$ 2.690.194,07	R\$ 2.787.494,07	R\$ 2.884.794,07	R\$ 2.982.094,07	R\$ 3.079.394,07	R\$ 3.176.694,07	R\$ 3.273.994,07

14	15	16	17	18	19	20
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00	R\$ 51.840.000,00
-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73	-R\$ 41.382.584,73
-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00	-R\$ 695.000,00
-R\$ 291.900,00	-R\$ 194.600,00	-R\$ 97.300,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27	R\$ 9.762.415,27
-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19	-R\$ 3.319.221,19
R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07
-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	-R\$ 2.780.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
R\$ 3.371.294,07	R\$ 3.468.594,07	R\$ 3.565.894,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07	R\$ 6.443.194,07