

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG
BRUNO DE MORAES**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE COGERAÇÃO EM CALDEIRAS A VAPOR DE
GRANDE PORTE**

**CASCADEL – PR
2017**

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG
BRUNO DE MORAES

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE COGERAÇÃO EM CALDEIRAS A VAPOR DE
GRANDE PORTE**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso I, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz – FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Me. Eng. Mec. Eliseu Avelino Zanella Junior.

CASCADEL – PR
2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG
BRUNO DE MORAES

VIABILIDADE ECONÔMICA DE COGERAÇÃO EM CALDEIRAS A VAPOR DE
GRANDE PORTE

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário FAG, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Me. Eng. Mec. Eliseu Avelino Zanella Junior

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof. XXXXXXXX
Fundação Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico

Avaliador Prof. XXXXXXXX
Fundação Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico

Avaliador Prof. XXXXXXXX
Fundação Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico

Cascavel, _____ de _____ de 20____.

DEDICATÓRIA

Dedico a esse trabalho primeiramente
a Deus por esse sonho realizado,
aos professores, família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela sua força majestosa em todos os momentos da minha vida.

À minha família que sempre me motivou, incentivou e me deu forças nas horas difíceis.

Às empresas Secamaq, Grupo TGM e WEG por disponibilizar dados fundamentais para realização do mesmo.

Ao meu orientador, Mestre Eliseu Avelino Zanella, por sua dedicação e preocupação em prol deste estudo.

RESUMO

O referente trabalho tem como objetivo buscar uma solução para redução de custos que envolvem o consumo de energia elétrica em empresas que possuem geradores de vapor, nas quais o estudo se estende explanando o funcionamento de um processo de cogeração em caldeira a vapor. Quando se obtém um processo que otimiza gastos secundários, a empresa fica mais competitiva, conseguindo assim fazer melhores estratégias em seu produto final. Os métodos adotados, para obtenção de dados e equipamentos, foram através de pesquisas quantitativas, e por meio de empresas para se obter valores reais e fornecedores para cotações e especificações técnicas dos equipamentos. Os cálculos realizados têm os fundamentos teóricos que foram extraídos de literaturas de renome e web sites. O processo de cogeração vai envolver o cavaco de eucalipto como combustível para uma caldeira mista flamotubular com fornalha aquatubular com superaquecedor, com saída de vapor superaquecido e turbina do modelo de contrapressão acoplado a um gerador elétrico. Desse modo, observa-se que alocar um processo de cogeração aumenta a eficiência de lucros, o que permite concluir que há empresas que já possuem a fonte de energia térmica, assim, é relevante analisar detalhadamente o processo de cogeração em sua corporação.

PALAVRAS-CHAVE: Cogeração; Geradores de vapor; Eficiência, Cavaco de eucalipto.

ABSTRACT

The objective of this work is to find a cost reduction solution that involves the consumption of electric energy in companies that have steam generators, in which the study extends explaining the operation of a cogeneration process in a steam boiler. When you get a process that optimizes secondary spending, the company becomes more competitive, thus making better strategies in your final product. The methods used to obtain data and equipment was through quantitative research, and through companies to obtain real values and suppliers for technical quotations and equipment specifications. The calculations performed have the theoretical foundations that have been extracted from reputed literatures and web sites. The cogeneration process will involve the eucalyptus wood chips as fuel for a mixed *flamotubular* boiler with *aquatubular* furnace with superheater, with superheated steam output and turbine of the backpressure model coupled to an electric generator. Thus, it is observed that allocating a cogeneration process increases the efficiency of profits, which allows, we can to conclude that there are companies that already have the source of thermal energy, so it is relevant to analyze in detail the process of cogeneration in your corporation.

KEYWORDS: Cogeneration; Steam generators; Efficiency, Eucalyptus wood chips.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Matriz de consumo final de energia nos anos 1973 e 2006.....	20
Gráfico 2: Oferta interna de energia em 2006 no Brasil.	21
Gráfico 3: Oferta interna de energia em 2006 no Mundo.	21
Gráfico 4: Participação dos Recursos Energéticos na Matriz Elétrica.	22
Gráfico 5: Oferta Interna de Energia Elétrica.....	24
Gráfico 6: Elevação do preço da energia elétrica.....	46
Gráfico 7: Estimativa do preço da energia elétrica.	47
Gráfico 8: Quantidade de calor fornecido X Opção de caldeira.....	58
Gráfico 9: Consumo de combustível por opções de caldeiras.....	59
Gráfico 10: Custo da tonelada de vapor produzido	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo da TIR.....	44
Equação 2: Cálculo do VPL.....	45
Equação 3: Cálculo da quantidade de calor fornecido.	47
Equação 4: Cálculo do consumo de combustível.....	48
Equação 5: Cálculo de interpolação.....	58
Equação 6: Custo do vapor.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição da Matriz Elétrica Nacional.	23
Tabela 2: Componentes exemplares de uma Caldeira	27
Tabela 3: Demanda total de vapor	49
Tabela 4: Detalhes das opções.	53
Tabela 5: Característica da 2ª opção de cogeração.....	54
Tabela 6: Característica da 3ª opção de cogeração.....	54
Tabela 7: Característica da 4ª opção de cogeração.....	55
Tabela 8: Característica da 5ª opção de cogeração.....	55
Tabela 9: Amostra de cavaco coletado.	56
Tabela 10: Poder Calorífico do cavaco de eucalipto.	57
Tabela 11: <i>Payback</i> da primeira opção.	61
Tabela 12: <i>Payback</i> da segunda opção.	62
Tabela 13: <i>Payback</i> da terceira opção.	62
Tabela 14: <i>Payback</i> da quarta opção.....	63
Tabela 15: <i>Payback</i> da quinta opção.	63
Tabela 16: <i>Payback</i> da quarta opção com fluxo de caixa.	64
Tabela 17: <i>Payback</i> da quinta opção com fluxo de caixa.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cogeração de energia.....	17
Figura 2: Cogeração em ciclo Rankine	18
Figura 3: Componentes de uma Caldeira complexa.	28
Figura 4: Caldeira Flamotubular - horizontal.	29
Figura 5: Caldeira Flamotubular - vertical.	30
Figura 6: Caldeira Aquatubular.....	31
Figura 7: Caldeira Mista.	32
Figura 8: Expansor	33
Figura 9: (A e B) Turbina de ação e reação (C e D) Princípio de ação e reação.	34
Figura 10: Estágio de Ação.	35
Figura 11: Exemplo de Turbina de Ação.	36
Figura 12: Estágio de Reação.	36
Figura 13: Exemplo de turbina de reação.	37
Figura 14: (a) Turbina de Contrapressão (b) Turbina de Condensação (c) Turbina de Condensação com extração.....	38
Figura 15: Exemplo de Gerador Elétrico.	39
Figura 16: Ciclo de Rankine básico.....	40
Figura 17:Ciclo de Rankine com superaquecimento.	40
Figura 18: Medidor de Umidade.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMB – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente.

kgf/cm²– Quilograma-força por centímetro quadrado.

KV – Quilovolt.

MME – Ministério de Minas e Energia.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego.

MW – Megawatt.

NR – Norma Regulamentadora.

RPM – Rotações por minuto.

Tv/h – Tonelada de vapor por hora.

TWh – Terawatt-hora.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 COGERAÇÃO	17
2.2 BIOMASSA.....	19
2.2.1 Geração de Energia Elétrica a partir de Biomassa.....	19
2.3 CALDEIRA	25
2.3.1 Tipos de caldeira	28
2.4 TURBINAS A VAPOR	32
2.4.1 Classificação das Turbinas a Vapor	35
2.5 GERADOR ELÉTRICO	38
2.6 REDUTORES DE VELOCIDADE.....	39
2.7 CICLO DE RANKINE	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 MATERIAIS	42
3.1.1 Cavaco de eucalipto	42
3.1.2 Caldeiras	42
3.1.3 Turbinas a Vapor	42
3.1.4 Demanda de vapor para processo industrial	42
3.2 MÉTODOS	43
3.2.1 Estudo de caso.....	43
3.2.2 Literaturas	43
3.2.3 Software	44
3.2.4 Conceitos da Viabilidade Econômica	44
3.2.5 Cálculo da energia elétrica	46
3.2.6 Consumo de combustível da caldeira	47
4 DESENVOLVIMENTO	49
4.1 DEMANDA DE VAPOR	49
4.2 OPÇÕES DE CALDEIRAS.....	50

4.3 OPÇÕES DE TURBINAS A VAPOR	51
4.4 MODELO DOS EQUIPAMENTOS	52
4.5 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	55
4.6 CUSTO DO VAPOR	59
5 RESULTADOS.....	61
6 CONCLUSÃO	65
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica quando apresentada junto aos centros de carga ou dentro dos próprios, como é o caso da autoprodução, conhecida como geração distribuída, só se tornou competitiva com a concentração em grandes usinas, à medida que a tecnologia se ampliou no sentido de aumentar a eficiência das máquinas acionadoras dos geradores elétricos (COBAS, 2001). Com esse pensamento, o presente trabalho vai avaliar a viabilidade econômica de produzir energia elétrica com o sistema de cogeração de energia em caldeira de vapor de grande porte, porém média produção de vapor. Analisando os fatores que vão influenciar no procedimento de produção de vapor, pois a mesma necessita de um amplo projeto por ter diversas variáveis, envolver múltiplos equipamentos de grande valor econômico. Portanto, o conceito será reduzir custos almejando, ao máximo, o aproveitamento do sistema e a implantação de novos equipamentos para a cogeração.

O presente estudo tem dados retirados de uma empresa brasileira fundada em 2003, no interior do Paraná, com menos de 300 funcionários. A empresa é especializada na elaboração e comercialização de proteínas derivadas de frango. Tem como objetivo básico a recuperação e aproveitamento de vísceras e penas de frangos provenientes de matadouros do Brasil, especialmente de Cooperativas do Oeste do Paraná, assim, recebem produtos com baixo valor agregado e transformam em uma matéria-prima mais enriquecida agregando valor, destinando-a a satisfazer necessidades de proteínas específicas na indústria de alimentos para animais (*petfood*) e também na linha de cosméticos para o comércio nacional e internacional. A empresa também tem a missão de buscar novos negócios através de novas soluções tecnológicas.

No estudo de caso, primeiramente foi analisado o consumo de vapor e a necessidade da pressão de trabalho dos equipamentos da empresa, na sequência, foi analisado um modelo de turbina que dispõe de tal demanda no processo industrial. Após ser determinada a turbina que se adéqua ao processo, foi realizado uma pesquisa para escolher a caldeira a vapor mais promissora, mas, para tal operação, exigem-se algumas modificações no processo de geração de vapor, pois, quanto mais energia térmica é fornecida à turbina, maior será a quantidade de energia elétrica obtida, por consequência, foram analisados vários modelos turbinas e caldeiras de tamanhos e pressões diferentes.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o mercado cada vez mais competitivo atualmente e com o elevado custo da energia, pequenas e grandes empresas buscam incessantemente a redução de custos de produção, logo, uma das melhores estratégias para se reduzir custos e alcançar esse objetivo é utilizar de maneira coerente o consumo de energia elétrica. Com isso, em empresas que já possuem sistema de vapor, o processo de cogeração em caldeiras a vapor fica muito mais atrativo.

Segundo ENGEMA [s.d.], a geração autônoma de energia elétrica, através de combustível de biomassa, é uma opção que beneficia não apenas o meio ambiente, como também adiciona uma maior lucratividade às empresas pela redução de custos e aumento da eficiência no aproveitamento de energia.

Azevedo (2000) define cogeração como: “Processos em que há produção simultânea de energia térmica e energia mecânica (normalmente convertida em energia elétrica), [...] a partir de uma fonte de combustível (biomassa, óleo, gás natural, gás propano, resíduos industriais, etc.)”. Brasil (2005) afirma que a cogeração atrai as empresas pela redução dos custos operacionais e o aumento da eficiência no aproveitamento de energia. Outro benefício da cogeração de energia é que ela pode contribuir para a segurança do suprimento energético nas organizações (KEEL, TAMOJA, VALDMA, 2005).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade econômica de produzir energia elétrica com o sistema de cogeração em caldeiras de vapor.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar qual o modelo de caldeira que melhor se adequa ao processo;

- Identificar a turbina que melhor atende às especificações da rede de vapor;
- Escolher o gerador correto conforme a produção de energia;
- Calcular o aumento do consumo de combustível entre as caldeiras diferentes;
- Analisar a viabilidade econômica;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COGERAÇÃO

Cogeração é uma combinação de calor útil e energia mecânica através de um sistema constituído por turbina a vapor ou de combustão (gás) que promove ação a um gerador de corrente elétrica, e um trocador de calor que readquire o calor residual para produção de vapor ou água quente. Nesse processo, há uma economia considerável de combustível, além de se ampliar a eficiência térmica do sistema (RIPOLI & RIPOLI, 2009).

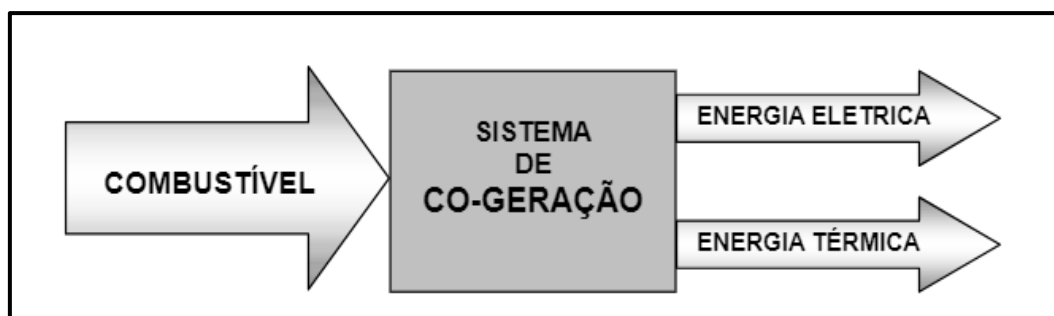
Segundo Aneel, um processo de cogeração consiste em:

Cogeração: processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária (ANEEL, 2000, p.02).

Quando se fala em cogeração, algumas vantagens importantes estão ligadas, como a maior eficiência na utilização da biomassa e a redução dos impactos ambientais. Esse processo é considerado também como uma prática de conservação de energia, pois aproveita o calor rejeitado em máquinas térmicas (NOGUEIRA; MARTINS, 1997).

Conforme Brasil (2005), cogeração é uma maneira de economizar de maneira inteligente a energia elétrica, pois se aproveita um tipo de combustível e, através desse sistema, obtém-se energia elétrica e térmica, conforme mostra a figura 01.

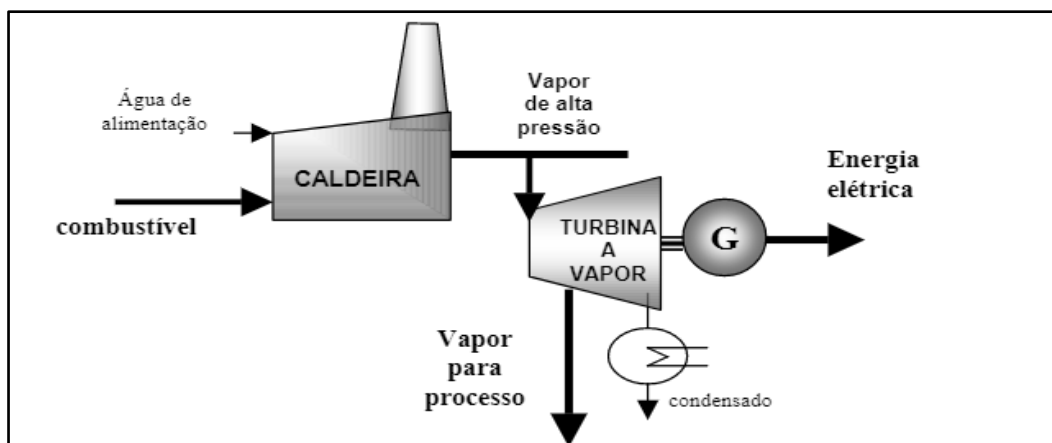
Figura 1: Cogeração de energia



Fonte: Brasil (2005)

O modelo de cogeração mais utilizado no mercado emprega o ciclo termodinâmico de Rankine, que é adotado em caldeiras e turbinas. A biomassa (combustível) é admitida gerando a queima, logo, essa combustão resulta em energia térmica, por conseguinte, o vapor de alta pressão é direcionado a uma turbina a vapor de (contrapressão ou condensação com extração), que aciona o gerador elétrico, conforme ilustrado na figura 02.

Figura 2: Cogeração em ciclo Rankine



Fonte: Brasil (2005)

Nesse sistema, o objetivo principal é gerar energia elétrica e o vapor de escape da turbina é empregado para atender a demanda de energia térmica do processo industrial.

Corrêa Neto (2001) classifica do seguinte modo “A cogeração é um arranjo inteligente do processo de conversão de um combustível em energia mecânica que, através de processos de aproveitamento do calor residual eleva a eficiência global de aproveitamento dos combustíveis” (CORRÊA NETO, 2001, p.65).

Conforme a Normativa Aneel nº 21, de 20 de janeiro de 2000, as condições necessárias para sistema de cogeração de energia são:

A cogeração de energia é definida como o processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica, geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia química disponibilizada por um ou mais combustíveis (ANEEL, 2000, p.01).

2.2 BIOMASSA

O consumo da biomassa como fonte energética é uma tendência mundial. Essa motivação se dá pela necessidade de reduzir a utilização de provenientes de fontes fósseis e, assim, tornar-se independente dos países exportadores e ainda reduzir os gases emitidos de fontes que são nocivas à atmosfera. Pois se trata de uma fonte renovável, com várias áreas possíveis para sua produção e também promove a geração de emprego (MULLER, 2005).

ABM (2008) afirma que a utilização da biomassa como fonte de energia pode ser considerada não poluente e renovável, sendo ainda de grande fartura e procedência de matérias orgânicas. Todos os organismos existentes que realizam fotossíntese podem ser aproveitados como biomassa.

Conforme Macedo (2001; 2003), cada região que rege sua tecnologia conforme a disponibilidade dos tipos de biomassa e essas tecnologias estão divididas em três escalas:

- Geração em pequena potência (menor que 1 MW): há pouca disponibilidade de biomassa, podem ser sistemas a vapor (alternativos ou turbinas), acoplados a motores (Diesel ou Otto);
- Geração em escala média/grande (dezenas de MW): constitui-se de ciclos de vapor em que a eficiência na conversão para energia elétrica será obtida através do nível de pressão utilizado. Mais comumente utilizado em usinas de cana-de-açúcar e de celulose/papel (cogeração);
- Geração em escala média/grande (dezenas de MW): são ciclos de gasificação / turbinas a gás. Essa tecnologia ainda está em desenvolvimento, entretanto, no Brasil, existem dois desses projetos localizados na Bahia utilizando cavaco de madeira e outro em São Paulo com o bagaço/palha de cana.

2.2.1 Geração de Energia Elétrica a partir de Biomassa

Comumente, a absorção energética da biomassa consiste na produção de energia térmica. Sendo que esse cenário se expandiu após as crises de petróleo, logo,

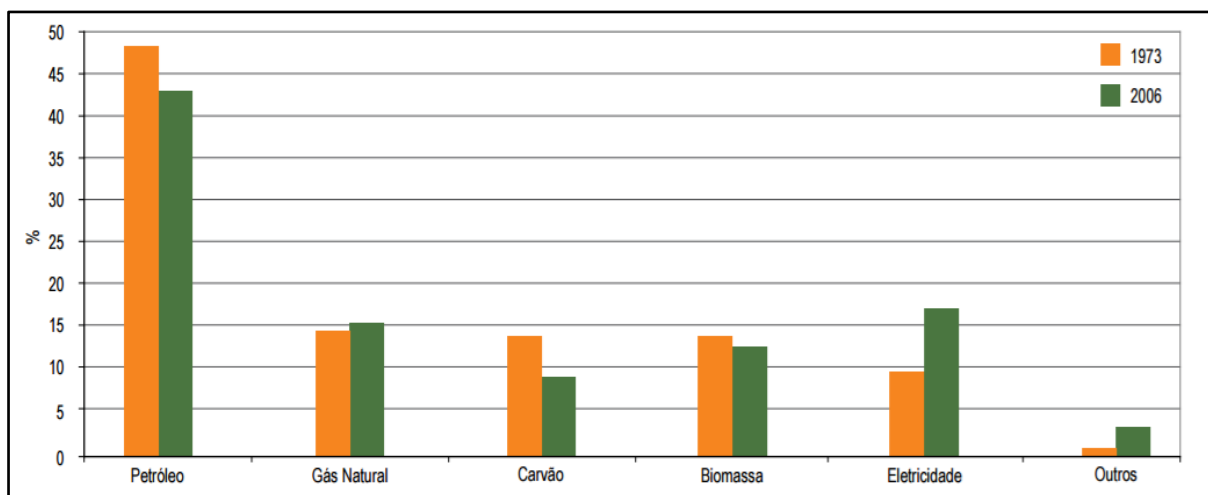
foi desenvolvida uma cadeia de tecnologias para geração de energia elétrica a partir da madeira (MULLER, 2005).

Conforme Macedo (2001), a produção de energia elétrica obtida pela biomassa no Brasil é estimada em torno de 3% (10TWh) da energia total. Afirma ainda que esse tipo de energia elétrica obtida da biomassa apresenta duas particularidades formidáveis.

- Pouca disponibilidade de localização, exigindo aumento de custos para coleta e transporte;
- Proporcionam forte economia (o investimento por unidade de insumo cai e as eficiências de conversão aumentam, com a capacidade);

Segundo Aneel (2002), entre todos os tipos de combustíveis para geração de energia a biomassa, é uma das que mais se destaca e tem um grande potencial de crescimento ao longo dos anos, pois ela é a principal alternativa para diversificação e, conseqüentemente, reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Pode-se ver, no Gráfico 01, um estudo a este respeito.

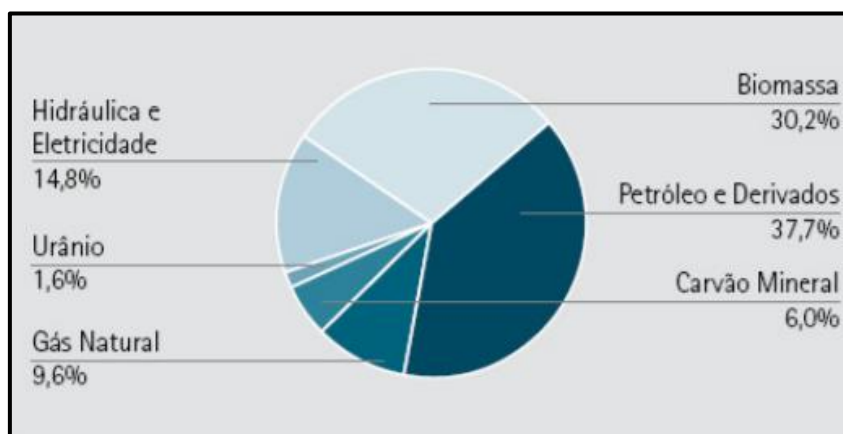
Gráfico 1: Matriz de consumo final de energia nos anos 1973 e 2006.



Fonte: Aneel (2002).

Conforme Strambi (2007), o Brasil tem a matriz energética fortemente marcada pelo consumo de fontes renováveis. Pode-se observar, no Gráfico 02, que a geração de eletricidade tem as hidrelétricas ocupando a maior parcela, outra grande parte são os veículos automotivos, os quais utilizam álcool obtido da cana-de-açúcar.

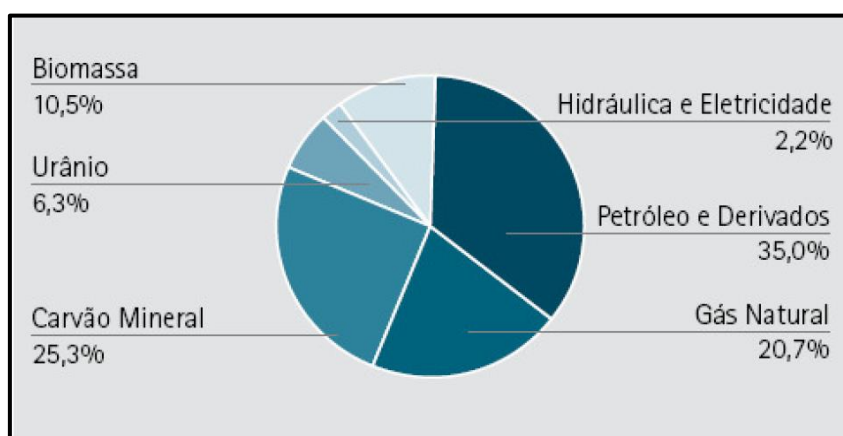
Gráfico 2: Oferta interna de energia em 2006 no Brasil.



Fonte: MME (2007).

No gráfico 03, é mostrada a demanda de energia no mundo, pode-se observar que as fontes renováveis (Hidroeletricidade e Biomassa), na matriz nacional conforme o gráfico 02, somam 45% e a mundial está em torno de 12,7%. Essa vantagem é muito agradável do ponto de vista ambiental, considerando que a sociedade está em um contexto em que se deseja reduzir as emissões de gás carbônico e suavizar a necessidade de importação de combustíveis fósseis.

Gráfico 3: Oferta interna de energia em 2006 no Mundo.

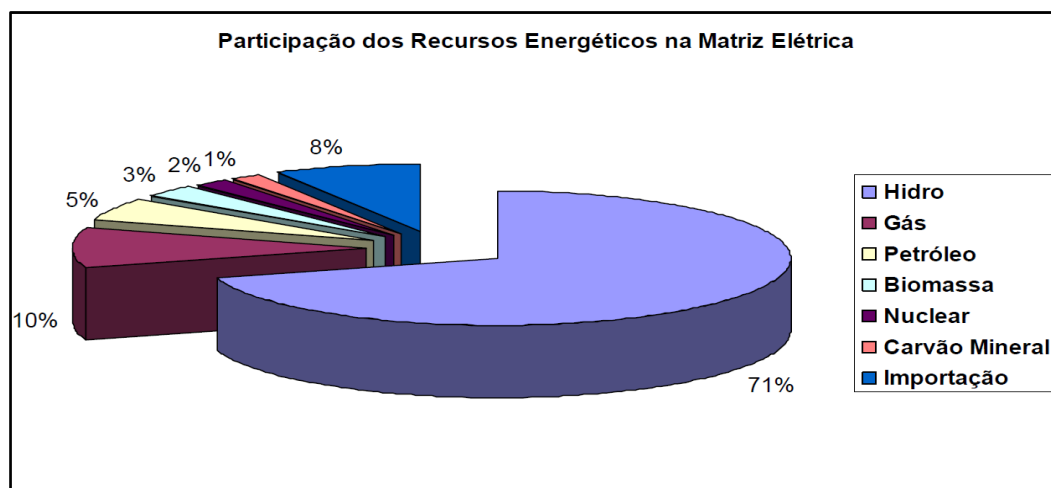


Fonte: MME (2007).

Conforme estudos, percebe-se que o cenário atual em usinas de porte médio ou grande já produzem energia satisfatória para suprir o próprio consumo térmico e elétrico com o uso de cogeração, por conseguinte, ficam independentes do abastecimento externo de eletricidade (STRAMBI, 2007).

Como é possível observar no gráfico 04, a energia obtida através hidrelétrica tem grande vantagens sobre as demais, porém, o aumento do consumo do bagaço da cana-de-açúcar, casca de arroz, resíduos de madeira e o biogás, tem causado um grande efeito no investimento do país na área de combustíveis derivados da biomassa.

Gráfico 4: Participação dos Recursos Energéticos na Matriz Elétrica.



Fonte: Muller (2005).

A tabela 01 apresenta um maior detalhamento dessa divisão de recursos energéticos.

Tabela 1: Composição da Matriz Elétrica Nacional.

Tipo		Capacidade Instalada		Total		%
		Nº de usinas	MW	Nº de usinas	MW	
Hidro		571	70.042	571	70.042	70,14%
Gás	Natural	70	8.976	94	9.878	9,89%
	Processo	24	902			
Petróleo	Óleo Diesel	461	4.093	480	5.261	5,27%
	Óleo Residual	19	1.168			
Biomassa	Bagaço de Cana	217	2.168	255	3.060	3,06%
	Licor Negro	12	666			
	Madeira	22	200			
	Biogás	2	20			
	Casca de Arroz	2	6			
Nuclear		2	2.007	2	2.007	2,01%
Carvão Mineral		7	1.415	7	1.415	1,42%
Eólica		11	29	11	29	0,03%
Importação	Paraguai		5.650		8.150	8,18%
	Argentina		2.250			
	Venezuela		200			
	Uruguai		70			
Total			99.862		99.862	100,00%

Fonte: adaptado de ANEEL (2005).

Segundo Muller (2005), a eletricidade a partir da biomassa, no Brasil, é obtida principalmente do aproveitamento de detritos (de cultivo ou até mesmo de processos industriais). Considerando esse cenário de aproveitamento energético da biomassa, é de evidente importância, pois consiste em um sistema de geração elétrica de fonte alternativa e, em razão disso, abrange a solução de um amplo problema ambiental e envolve o setor econômico agrícola e florestal. Todavia, esse recurso, ainda na sua forma primária, possui algumas limitações:

- Desigualdade da qualidade dentro da mesma matéria prima (umidade, poder calorífico entre outras variáveis);
- Disponibilidade vaga, no quesito de distribuição geográfica;
- Perda de eficiência do solo;

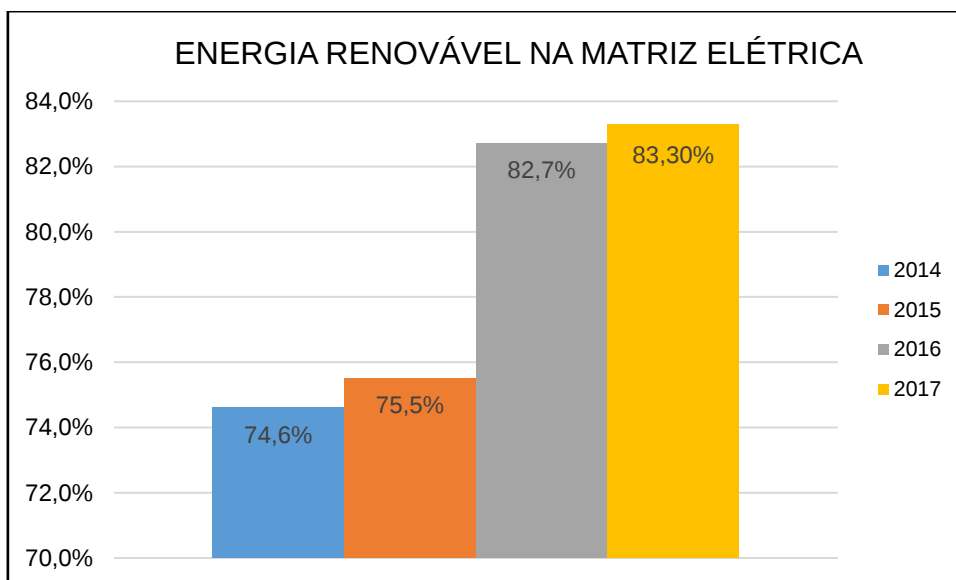
- Demanda x oferta, oferta está interligada ao desempenho da agilidade geradora de resíduos.

Segundo Fraga (2016), o estado econômico financeiro desenvolveu oportunidades de crescimento para fontes de energia renováveis, pois a instabilidade e a dificuldade fizeram os empresários procurar meios de economizar e, até mesmo, lucrar com esse tipo de energia, pois o variante preço da energia elétrica e a insegurança sobre o fornecimento fizeram que fontes renováveis tivessem um crescimento bem relevante.

Afirma-se ainda que, entre as fontes que cresceram, a Biomassa tem a maior representatividade e esta se manteve acima da média dos investimentos que conseguiram se destacar no ano de 2015, além disso, a tecnologia embutida nesse potencial só tende a aumentar.

No Brasil, o aumento de energia gerada atrás de fontes renováveis vem crescendo, isso pode ser notado por meio de uma pesquisa realizada pelo Ministério de Minas e Energia, conforme é apresentado no Gráfico 05 (MME, 2017).

Gráfico 5: Oferta Interna de Energia Elétrica.



Fonte: Adaptado do MME (2017).

O Balanço Energético Nacional (2015) afirma que, no Brasil, 41,2% da matriz energética são de fontes renováveis, sendo entre elas: biomassa, hidráulica, lixo entre outras, os outros 58,8% restantes são de fontes não renováveis como petróleo, gás natural, urânio e entre outros. Assim, quando se fala de energias renováveis na

matriz elétrica, o Brasil obtém uma grande porcentagem de renováveis, obtendo, em 2015, uma média de 75,5%, enquanto a média mundial é 21,2% e a OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) está próxima a 20% de fontes renováveis.

2.3 CALDEIRA

Conforme a NR 13, “caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia” (MTE, 2017, p.1). Sendo que essas fontes de energias podem ser da mais diversificada sendo do estado sólido ou líquido.

Entende-se como gerador de vapor, o equipamento que tem como intenção transformar água líquida em vapor de água, sobre maiores pressões do que a pressão atmosférica. Com essa modificação de fase conhecida como vaporização, o vapor possui um elevado potencial térmico, com destinação em múltiplos ramos como geração de potência mecânica e elétrica, usado também para aquecimento em processos industriais entre outros (DALL’ORTO, [s.d.]).

Segundo Bazzo (1995), o início dos equipamentos destinados a gerar vapor nasceu pela necessidade de encontrar uma fonte de energia térmica centralizada, que fosse de fácil condução, e que não se usasse o modo inconveniente como a queima direta do carvão.

As caldeiras a vapor têm uma grande precedência em relação a outros sistemas de produção de energia, pois sua preferência é explicada pelo alto poder calorífico que há e, principalmente, pela extensa disponibilidade da água no meio industrial.

Conforme Braga (2001), os geradores de vapor, também conhecido como caldeiras, são definidos também como trocadores de calor.

Em um trocador de calor os fluidos com temperaturas diferentes permanecem separados e o calor é transferido continuamente através de uma parede, pela qual se realiza a transferência de calor, no contato direto ou indireto (BRAGA, 2001, p.285).

Conforme Alves (2002), qualquer tipo de caldeira a vapor sempre será composto por três elementos fundamentais, para sua operação que são: câmara de água ou vapor, câmara de vapor e fornalha. Outras partes como à chaminé e dutos para descarga dos gases efetivamente não fazem parte da caldeira; estão em construções independentes e não estão sobre a ação do vapor.

A *fornalha* ou *câmara de combustão* é a parte onde se usa o combustível para a produção de calor, por conseguinte, o calor é utilizado no aquecimento da água. No caso de combustíveis sólidos, a fornalha necessita de grelhas, nas quais, o combustível é queimado. O espaço livre para o desenvolvimento das chamas é denominado câmara de combustão. Quando os combustíveis da caldeira são líquidos, gases ou produtos pulverizados, não se necessita da grelha e, neste evento, a fornalha está composta por uma câmara no interior, onde é injetado o combustível gasoso, líquido ou pulverizado, que queima ao entrar em contato com o ar quente que entra na fornalha através de portas específicas.

A câmara de água e vapor compõe a superfície interna da caldeira, a qual é formada de recipientes metálicos herméticos, de resistência conforme sua demanda. Suas formas geométricas geralmente são em cilindros, tubos, coletores entre outros. Sua face interna contém água a ser vaporizada, estando quase toda sua superfície externa em contato com as chamas da combustão. Sendo que a parte inferior desse recipiente recebe o nome de câmara de água; o espaço que limita a superfície da água e a parte superior denomina-se câmara de vapor (ALVES, 2002).

Geradores de vapor de elevado porte são compostos por uma agregação de componentes, os quais formam um dispositivo complexo, conforme a Tabela 2 (ELETROBRÁS; PROCEL, 2005).

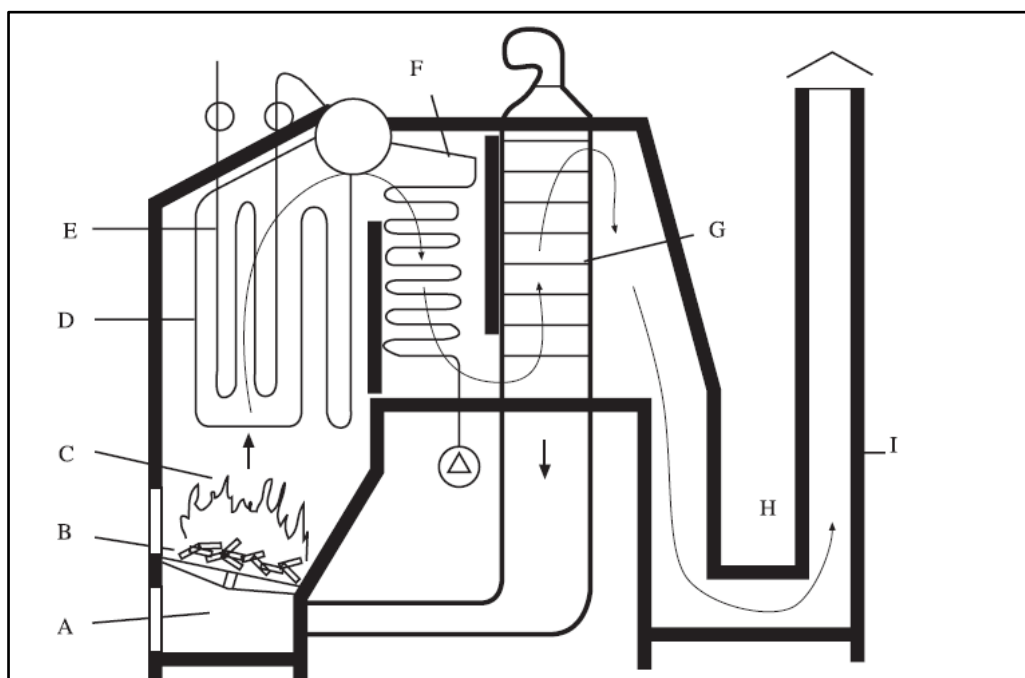
Tabela 2: Componentes exemplares de uma Caldeira

A	Cinzeiro	Lugar onde se depositam cinzas e ou, eventualmente, restos de combustíveis que atravessam o suporte de queima sem completarem sua combustão.
B	Fornalha	Local onde se inicia o processo de queima seja de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos.
C	Câmara de combustão	Volume onde se deve consumir todo o combustível antes de os produtos de combustão atingir e penetrar no feixe de tubos. Por vezes, confunde-se com a própria fornalha, dela fazendo parte; outras vezes, pode-se separar completamente.
D	Tubos Evaporadores	Correspondem ao vaso fechado e pressurizado com tubos contendo água no seu interior, a qual, ao receber calor, transforma-se em vapor.
F	Economizador	Componente onde a temperatura da água de alimentação sofre elevação, aproveitando o calor sensível residual dos gases da combustão direcionados à chaminé.
G	Pré-aquecedor de ar ou pré-ar	Componente cuja função é aquecer o ar de combustão dos gases de combustão até a chaminé. Podem ser de alvenaria ou de chapas de aço, conforme a temperatura dos gases que neles circulam.
I	Chaminé	É a parte que garante a expulsão dos gases de combustão com velocidade e altura determinadas para o ambiente e, indiretamente, promovem a boa circulação dos gases quentes da combustão através de todo o sistema pelo chamado <i>efeito de tiragem</i> .

Fonte: adaptado de ELETROBRÁS, PROCEL (2005).

Para maior esclarecimento das partes citadas na Tabela 2, pode-se identificar os elementos exemplares e o princípio de funcionamento demonstrados na Figura 3.

Figura 3: Componentes de uma Caldeira complexa.



Fonte: ELETROBRÁS, PROCEL (2005).

2.3.1 Tipos de caldeira

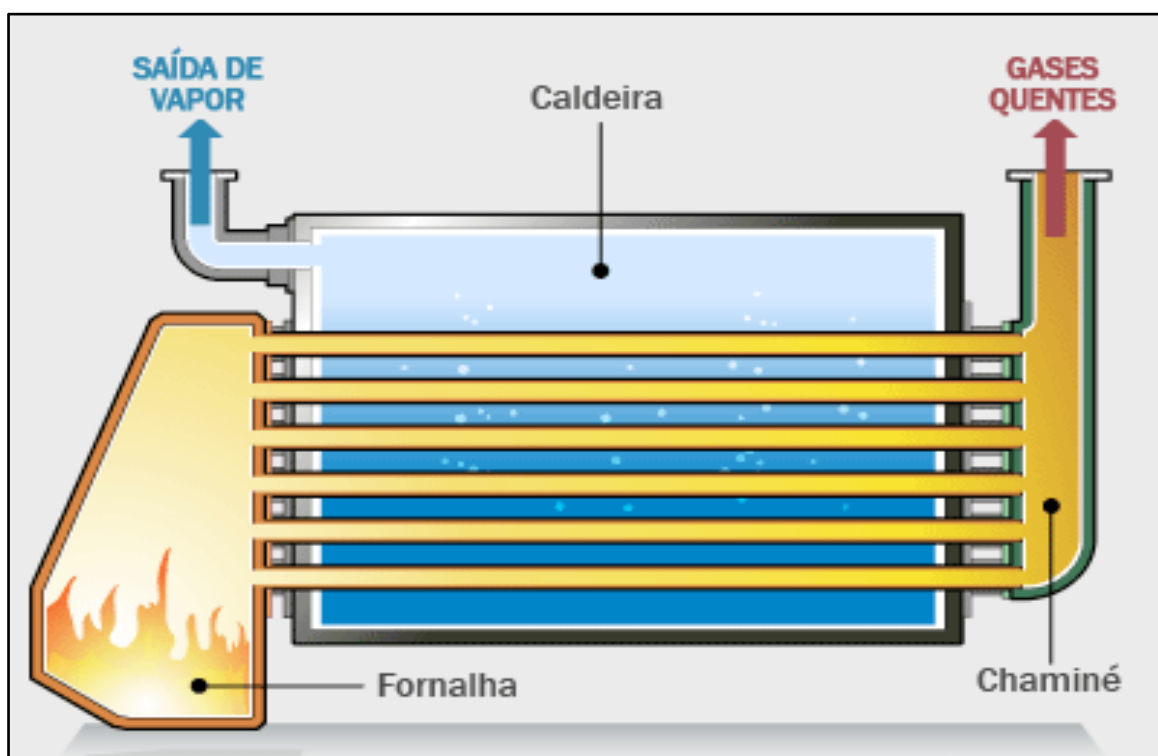
Como o foco da pesquisa não é detalhar uma caldeira, serão divididas as suas principais características de trabalho.

Conforme Elektro [s.d.], os geradores de vapor a combustíveis podem ser distribuídos em dois grandes grupos: caldeiras flamotubulares e caldeiras aquatubulares. Sendo que cada uma possui uma característica específica, pois as caldeiras flamotubulares apresentam menor porte, baixa eficiência e pressões reduzidas, porém, é muito utilizada ainda por seu baixo investimento financeiro, a mesma admite qualquer tipo de combustível, sólido, líquido ou gasoso. Já as caldeiras aquatubulares podem custar até 50% a mais do que uma flamotubular do mesmo porte, porém, possuem algumas vantagens, como temperaturas mais elevadas, pressões acima de 60 kgf/cm² e maior capacidade de produção de vapor.

2.3.1.1 Caldeiras Flamotubulares

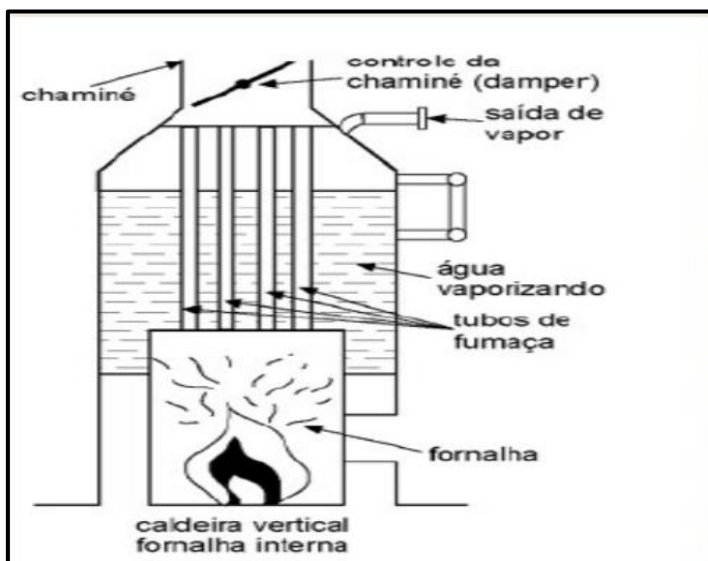
Sendo o primeiro modelo de gerador de vapor estabelecida, também é conhecida como *tubo-de-fogo*, *tubo-de-fumaça* ou *pirotubular*, por causa dos gases liberados pela combustão que circulam no interior dos tubos, com água por fora dos mesmos. Nota-se que sua construção é simples, sendo um corpo cilindro com água a ser evaporada e um cilindro interno onde está ligada à fornalha, conforme mostra a Figura 4 (ELETROBRÁS; PROCEL, 2005).

Figura 4: Caldeira Flamotubular - horizontal.



Fonte: Antonio (2017).

Figura 5: Caldeira Flamotubular - vertical.



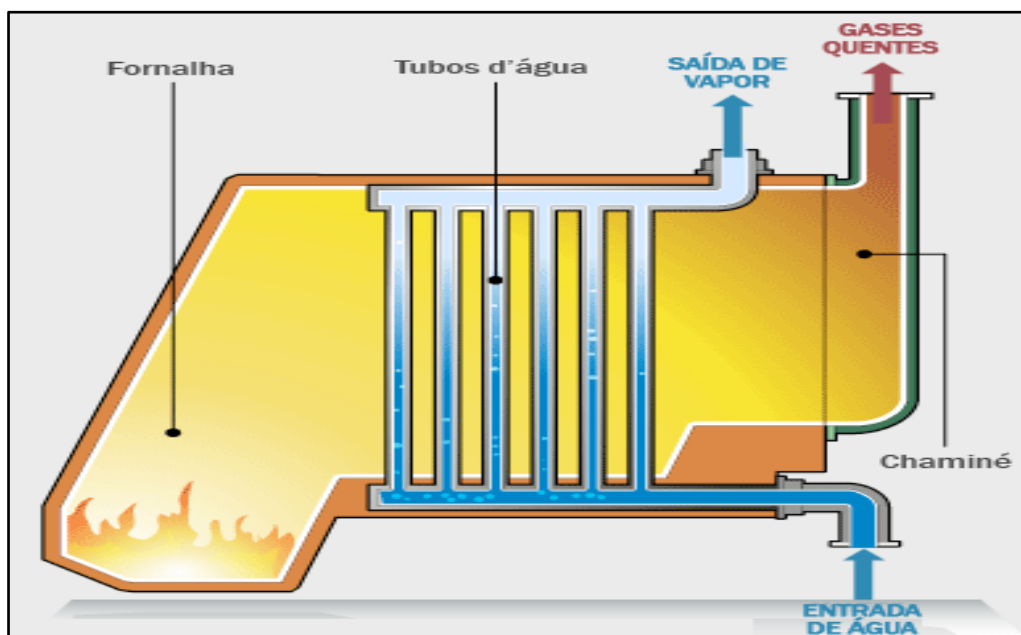
Fonte: Strobel [s.d.].

Conforme Strobel [s.d.], os gases gerados da queima do combustível percorrem dentro dos tubos que ficam imersos na água a ser vaporizada. Entretanto, esse tipo de caldeira tem um baixo rendimento térmico em relação ao seu espaço ocupado, geralmente utilizadas em pequenas indústrias, hotéis e hospitais devido ao baixo valor de investimento e facilidade na manutenção.

2.3.1.2 Caldeiras Aquatubulares

Ao mesmo tempo conhecidas como Caldeiras Tubos de Água, essas se diferenciam dos modelos flamotubulares pois a água a ser evaporada circula no interior dos tubos e os gases quentes da combustão contornam a superfície externa. Esse modelo de caldeira é empregado quando se quer obter grandes pressões, elevado rendimento térmico e maior produção de vapor, pois nos tubos de alta pressão são criados esforços de tração ao invés de compressão, como se ocorre nas flamotubulares (MARTINELLI, 2003). Na Figura 6, é apresentado um modelo desse gerador de vapor.

Figura 6: Caldeira Aquatubular.

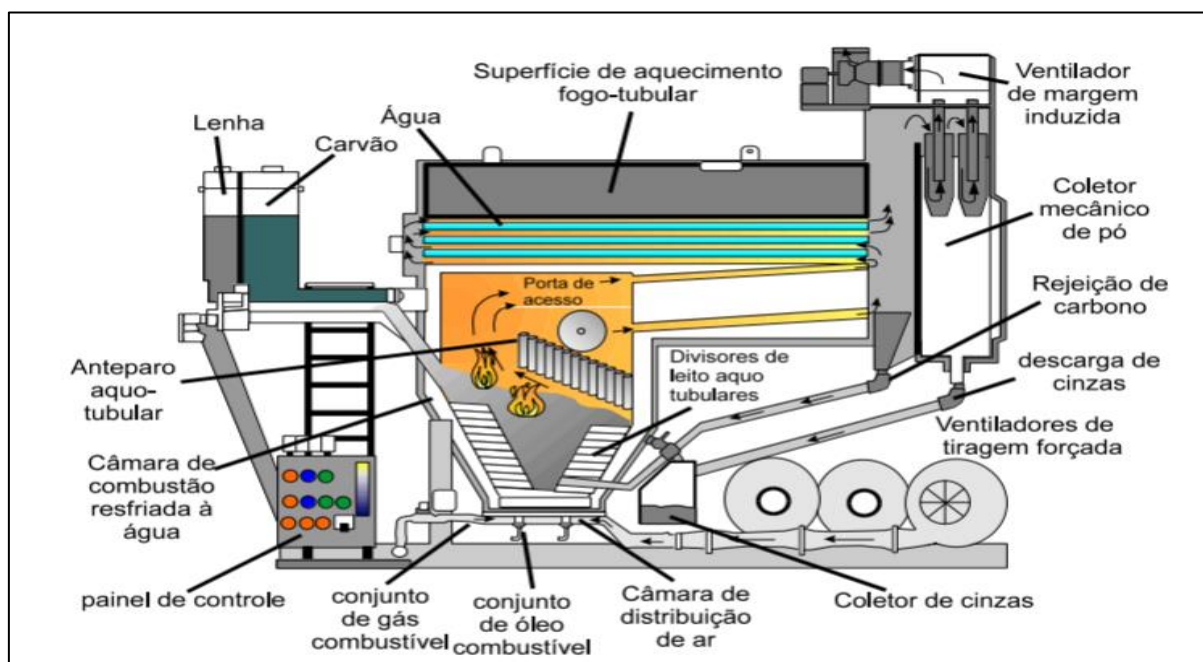


Fonte: Antonio (2017).

2.3.1.3 Caldeiras Mistas

Esse tipo de caldeira tem a mesma função que as demais, porém, há algumas peculiaridades nela. Por exemplo, em sua fornalha, o método adotado é aquatubular, ou seja, água por dentro dos tubos, enquanto que, em sua superfície, os gases de combustão passam por dentro do tubo caracterizando uma caldeira flamotubular, conforme a Figura 7 (ENERSOLUTION, 2017).

Figura 7: Caldeira Mista.



Fonte: HD Energia Verde (2017).

2.4 TURBINAS A VAPOR

Meneses (2011, p.05) demonstra que “a turbina é um equipamento rotativo, que normalmente opera em regime permanente, dedicado a fornecer trabalho na ponta de eixo (ou potência)”.

Uma turbina a vapor é um motor térmico rotativo no qual a energia térmica do vapor, medida pela entalpia, é transformada em energia cinética devido a sua expansão através dos bocais. Esta energia então é transformada em energia mecânica de rotação devido à força do vapor agindo nas pás rotativas (LORA; NASCIMENTO, 2004).

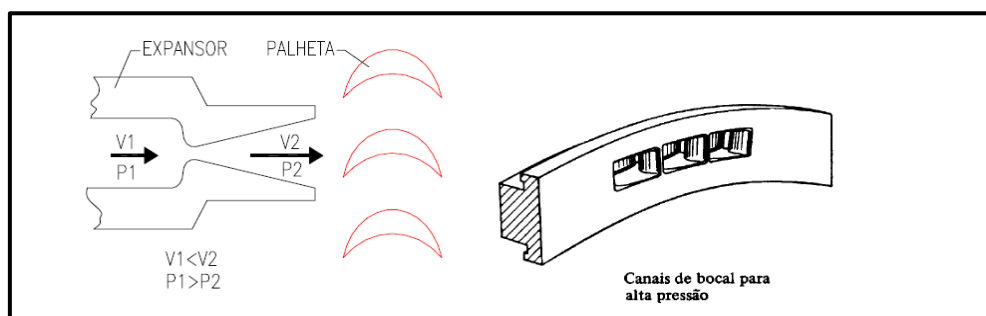
Silva (1995) esclarece que as indústrias usam turbinas para vários fins, tais como para produção de energia elétrica, sopradores, bombas entre outros recursos específicos conforme a necessidade da empresa. Geralmente, a necessidade do processo industrial é que determina onde a turbina vai atuar com maior eficiência almejando aumentar o rendimento da instalação.

Tavares (1995) afirma ainda que fatores econômicos encorajam as empresas à prática de autoprodução de energia elétrica ao invés de importá-la da rede da distribuidora.

A turbina a vapor é máquina motriz que usa energia cinética como fonte de alimentação, a força e a temperatura do vapor dentro do sistema fazem com que, as pás do rotor atinjam a devida variação de velocidade, conseqüentemente, gera o acionamento de geradores elétricos, compressores, turbo bombas e sopradores, ou seja, sua função é transformar energia térmica em energia mecânica. A turbina a vapor é atualmente a mais usada dentro dos diversos tipos de acionadores primários existentes. Com o aumento de tecnologia, uma série de características favoráveis fez com que a turbina a vapor se destacasse na competição com outros acionadores primários, como turbina hidráulica, turbina a gás e motor de combustão interna (MARTINELLI, 2002).

Segundo Machado (2010), em uma turbina a vapor, tem-se duas etapas de trabalho. Inicialmente, temos a transformação da energia fornecida pelo vapor em energia cinética, que é obtida através de pequenos orifícios (expansores - apresentados na Figura 8), onde o vapor atinge alta velocidade, devido ao estrangulamento da área de passagem, desse modo, aumenta-se sua energia cinética, porém, diminui sua entalpia. Com a ocorrência desses fatores, também ocorre a queda de pressão e de temperatura, obtendo-se o aumento do volume específico do vapor dentro do expansor.

Figura 8: Expansor



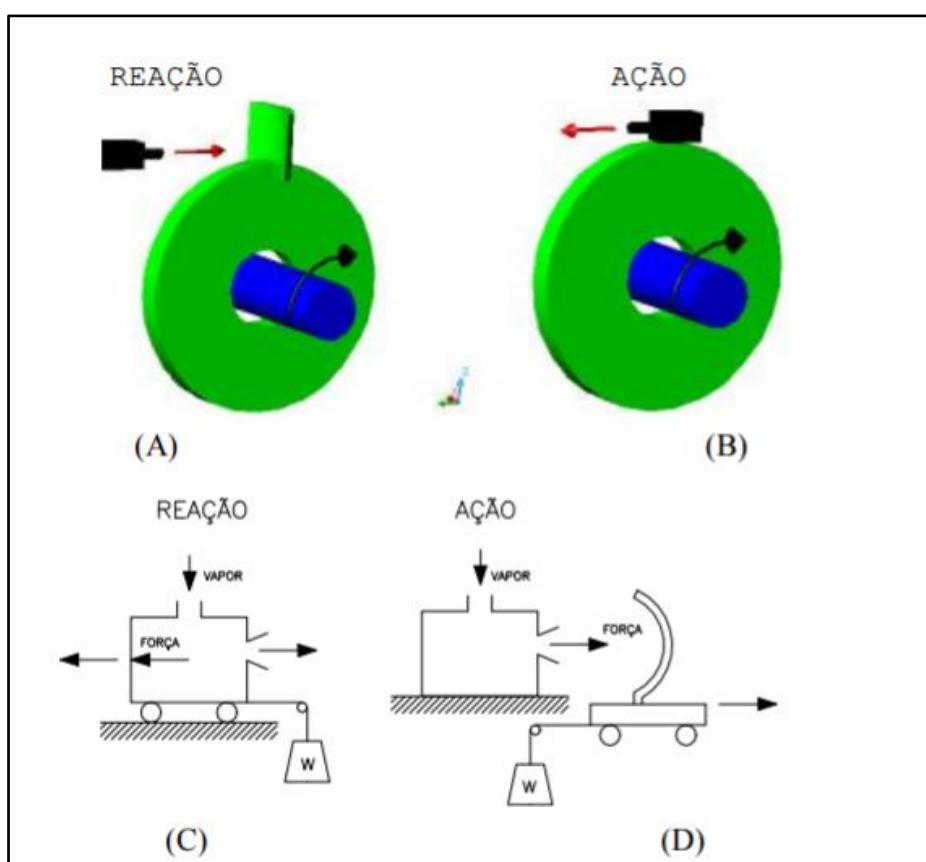
Fonte: UNIJUÍ (2002).

Considerando a 2ª Lei da Termodinâmica, sistematizada pelo físico francês Sadi Carnot, sabe-se que, somente parte da energia contida no vapor que chega à

máquina poderá ser convertida em trabalho (exergia), porém, a outra parte do vapor que não se pode obter trabalho (anergia), permanece no vapor aliviado pela máquina.

Na segunda variação, a energia cinética obtida no expensor é convertida em energia mecânica. Podendo ser pelo princípio da Ação ou pelo princípio da Reação, sendo que em ambas é possível aproveitar a energia cinética obtida pelo expensor, transformando-a em trabalho mecânico. Esse fenômeno ocorre conforme demonstrado na figura 09.

Figura 9: (A e B) Turbina de ação e reação (C e D) Princípio de ação e reação.



Fonte: UNIJUÍ (2002).

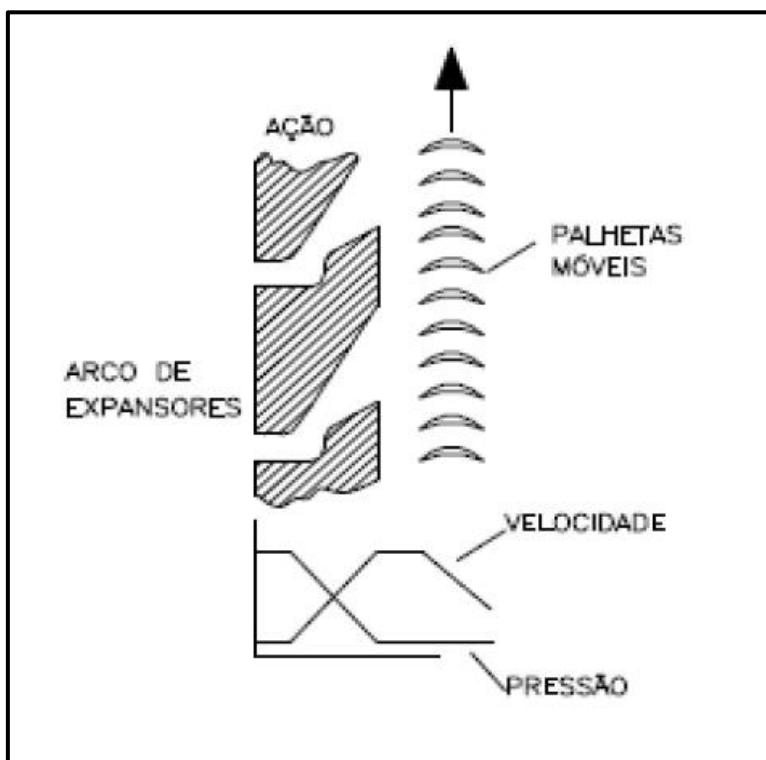
Brasil (2005) notifica que, uma turbina a vapor tem uma ligeira vantagem ao ser comparada com uma turbina a gás, pois sua manutenção é muito reduzida, pois recebe a massa de vapor com temperaturas menores e com melhor qualidade de impureza, considerando que este vapor seja sempre seco e que se façam manutenções preventivas e preditivas, então sua vida útil pode ser de várias décadas.

2.4.1 Classificação das Turbinas a Vapor

Os elementos a vapor podem ser classificados em Turbinas de Reação e Ação, se uma câmara de combustão obtiver um jato direcionado para uma palheta. Em torno de um eixo girante, então, teremos uma turbina de ação elementar (PAIVA, 2007).

Paiva (2007) afirma ainda que, em uma turbina de médio e grande porte de ação real, têm-se vários expansores em paralelo, os quais se constituem um arco de expansores que tomam toda sua circunferência. Esse modelo também é conhecido como rodas de palhetas fixas, ilustrado na Figura 10. Na Figura 11 é apresentado um exemplo de turbina de ação.

Figura 10: Estágio de Ação.



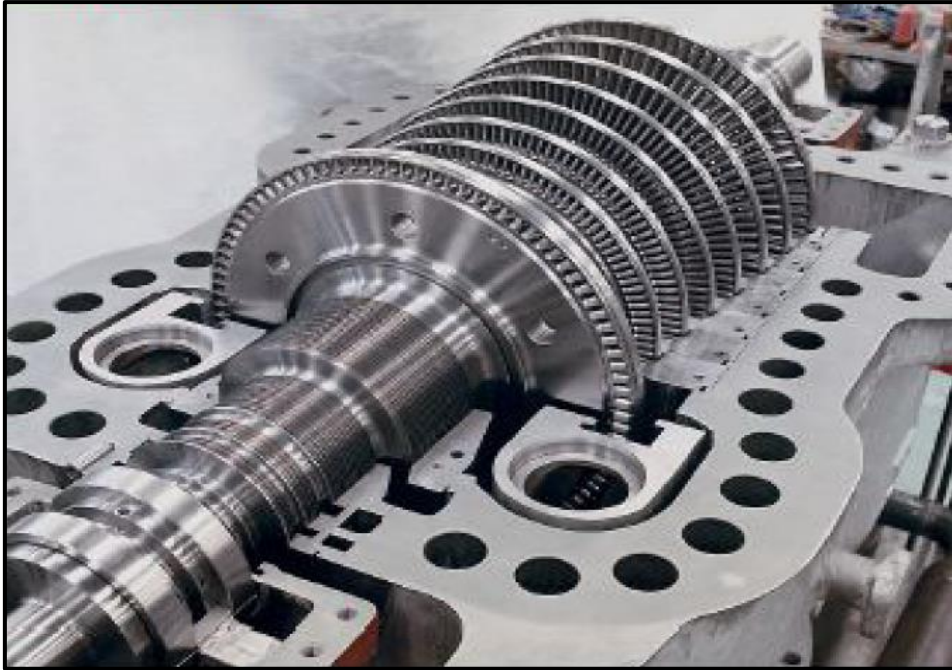
Fonte: PAIVA (2007).

Algumas de suas características são:

- Transformação de Energia Cinética em Mecânica;
- Pressão constante nas palhetas móveis;

- Transformação da variação de Entalpia em Energia Cinética.

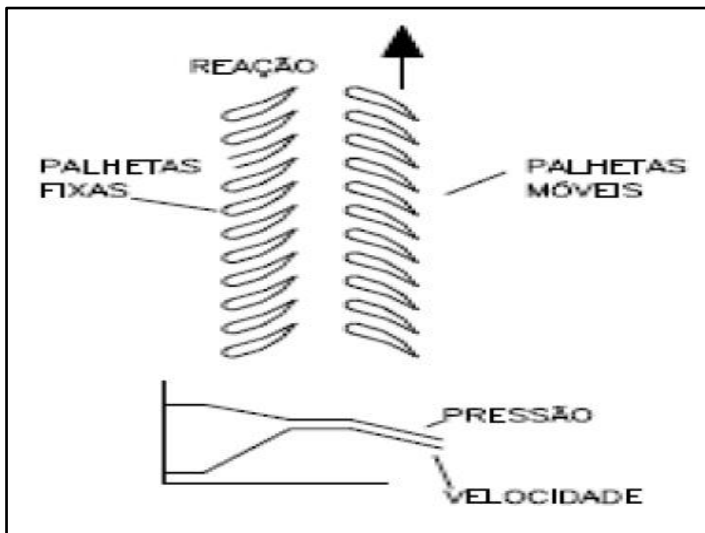
Figura 11: Exemplo de Turbina de Ação.



Fonte: PAIVA (2007).

Segundo Paiva (2007), a turbina de reação comercial sempre haverá múltiplos estágios em série, sendo cada estágio composto de um anel expensor e seguido por uma roda de palhetas móveis, conforme apresenta a Figura 13. Também é apresentado um exemplo de turbina de reação na Figura 14.

Figura 12: Estágio de Reação.



Fonte: PAIVA (2007).

Suas características principais são:

- Pressão variável no anel;
- Expansão do vapor nas palhetas fixas e nas rodas móveis.

Figura 13: Exemplo de turbina de reação.

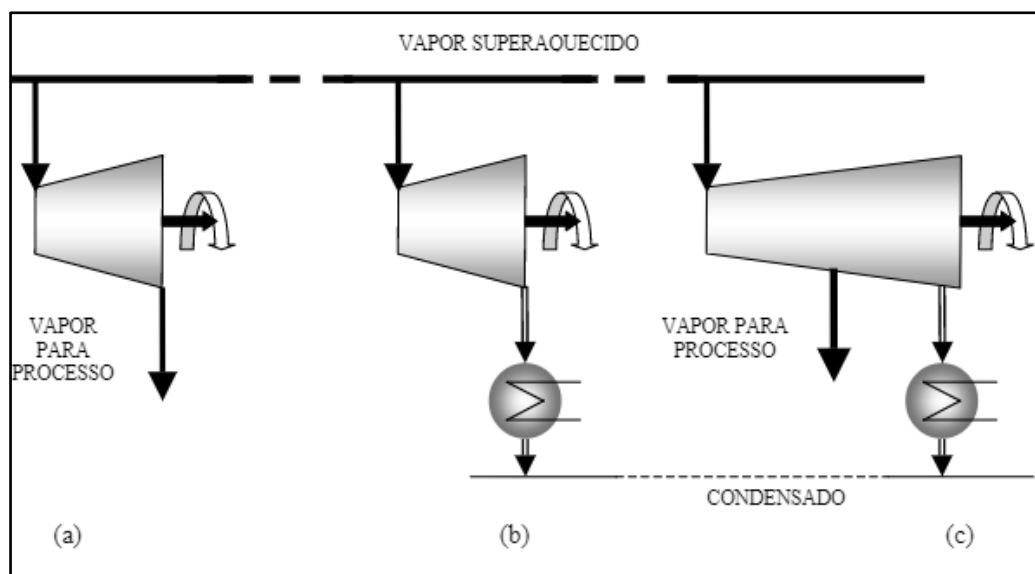


Fonte: PAIVA (2007).

Conforme França e Caseiro (2007-2008), as turbinas a vapor podem ser classificadas conforme as configurações a seguir:

- Contrapressão: nesse caso, a pressão de escape da turbina é a pressão atmosférica ou uma pressão mais elevada.
- Condensação: nesse tipo de turbina, o vapor “retirado” sai a pressões inferiores à pressão atmosférica.

Figura 14: (a) Turbina de Contrapressão (b) Turbina de Condensação (c) Turbina de Condensação com extração.



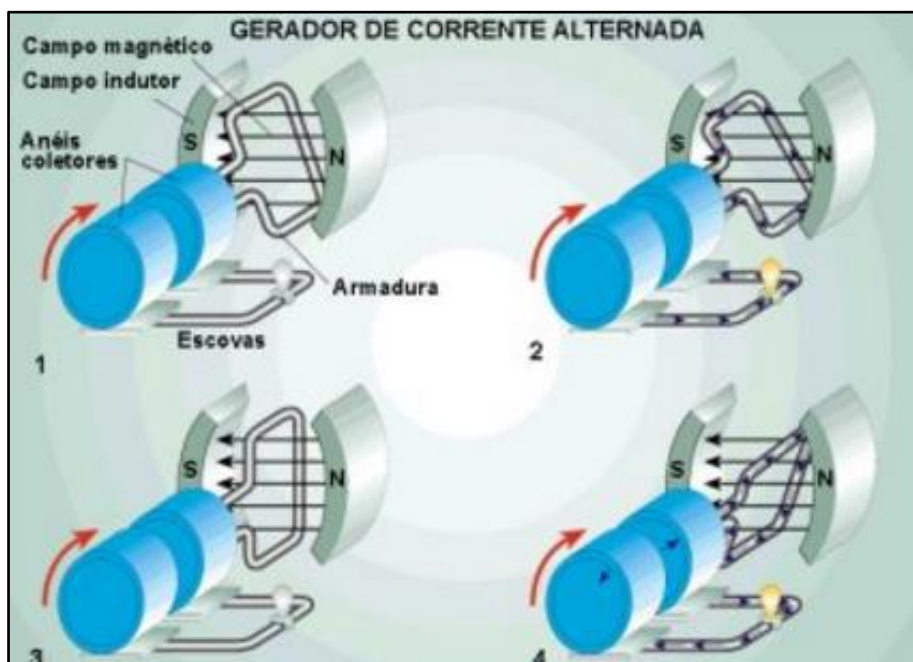
Fonte: Brasil (2005).

2.5 GERADOR ELÉTRICO

É um equipamento capaz de converter energia mecânica, química e outros tipos em energia elétrica. Esse dispositivo é composto por dois polos (positivo e negativo) ilustrado na figura 16, gerando um campo magnético entre esses dois pontos (TECNOGERA, 2015).

Conforme Meneses (2011), são os geradores que transformam a energia fornecida dos equipamentos primários em energia elétrica. Na maioria dos casos, escolhe-se o tipo de gerador que será utilizado e, com isso, recomenda-se a máquina primária com a potência adequada. Além da potência, deve-se pensar qual é o tipo da máquina (eólica, a gás, vapor, etc.) e definir qual rotação será transmitida para o gerador. Para rotações acima de 3600 rpm, será indispensável o uso de redutores de velocidade.

Figura 15: Exemplo de Gerador Elétrico.



Fonte: Copel (2017).

2.6 REDUTORES DE VELOCIDADE

De uma forma bem breve, um redutor de velocidade é um equipamento mecânico que realiza a redução de velocidade (rpm) de uma máquina acionadora. Sua composição básica é: eixo de entrada e saída, conjunto de engrenagens, rolamentos e a carcaça. Seu funcionamento tem como base a lei da física, conforme a sua rotação for menor o torque será mais elevado (MELCONIAN, 2008).

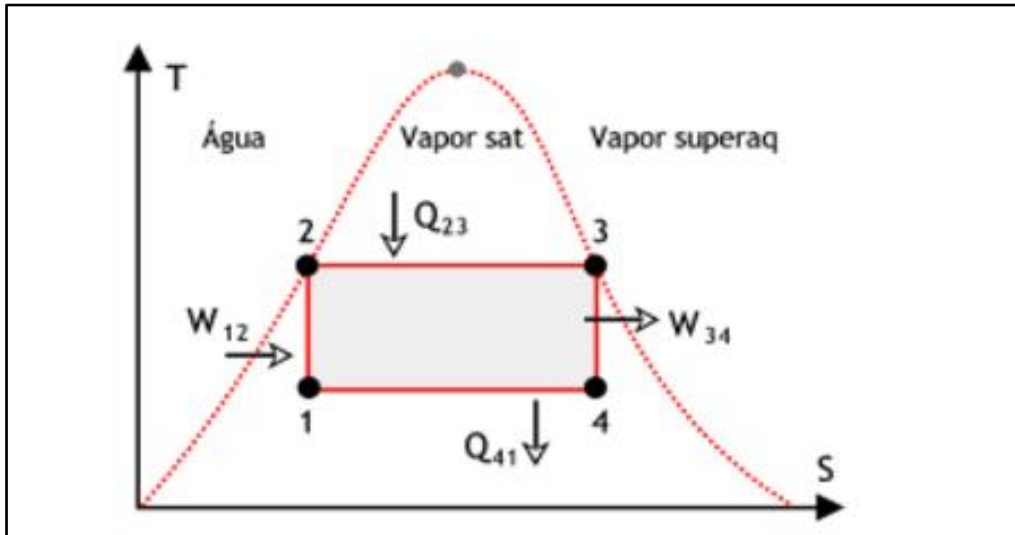
Por causa da rotação da turbina, que é de 5 a 10 vezes maior que a do gerador, o mesmo será acoplado a um redutor de velocidade, pois a geração é trifásica em 13.8 KV e a saída da energia elétrica passa necessariamente por um transformador convertendo a tensão de consumo que é de 440 Volts (AVELINO, 2008).

2.7 CICLO DE RANKINE

Conforme Panosso (2003), o ciclo de Rankine, em sua forma mais básica, possui quatro componentes: bomba, gerador de vapor, turbina e condensador,

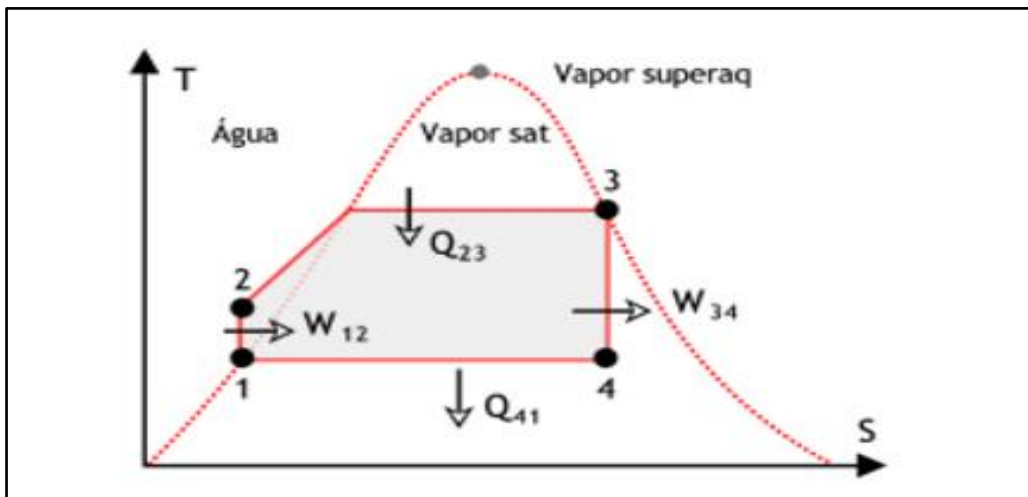
demonstrados na figura 16, ilustrando o funcionamento do ciclo Rankine e o diagrama de temperatura por entropia ($T \times S$) e, na figura 17, o ciclo de Rankine com superaquecimento.

Figura 16: Ciclo de Rankine básico.



Fonte: MSPC (2017).

Figura 17: Ciclo de Rankine com superaquecimento.



Fonte: MSPC (2017).

“Admita que o estado 1 seja líquido saturado e que o estado 3 seja vapor saturado ou superaquecido. Este ciclo recebe a denominação ciclo de Rankine e é o ideal para uma unidade motora simples a vapor” (WYLEN, 2003, p.313).

A Figura 17 é composta pelos processos:

1-2: Processo de bombeamento adiabático reversível, na bomba.

2-3: Transferência de calor a pressão constante, na caldeira.

3-4: Expansão adiabática reversível, na turbina (ou noutra máquina motora tal como máquina a vapor).

4-1: Transferência de calor a pressão constante, no condensador (WYLEN, 2003, p.313).

Wylen (2003) ainda define que o rendimento térmico do ciclo de Rankine é menor em relação ao de Carnot que opera com as mesmas condições de temperaturas máximas e mínimas do ciclo de Rankine. Porém, o ciclo de Rankine tem duas razões primordiais que fazem a diferença. A primeira envolve a condição de bombeamento no ciclo de Rankine, a condensação completa do vapor, em seguida, a bomba trabalha somente com líquido. Já no ciclo de Carnot, o estado desse mesmo processo resulta em uma mistura de líquido e vapor, no qual se dificulta muito o processo da bomba. E o segundo motivo rege o superaquecimento do vapor, pois, no ciclo de Rankine, o vapor é superaquecido e a pressão constante. Durante esse processo no ciclo de Carnot, a pressão cai, expressando que o calor deve ser transferido ao vapor enquanto ele sofre um processo de expansão, o que é muito difícil se conseguir na prática.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cavaco de eucalipto

Inicialmente, através da empresa ZETEC, que é especializada em combustão industrial e mecânica dos fluídos, obteve-se dados essenciais sobre o cavaco de eucalipto como (poder calorífico x umidade). Entretanto, foi utilizado um analisador de umidade de sólidos e granulados da marca Marrari modelo M75.

3.1.2 Caldeiras

Consequentemente, a pesquisa proporcionará duas opções de caldeiras, sendo dos modelos flamotubulares e aquatubulares, sobre os quais a empresa SECAMAQ forneceu informações características de cada modelo assim como o custo financeiro.

3.1.3 Turbinas a Vapor

O estudo ainda apresentará um modelo de turbina a vapor de contrapressão e outra de extração com condensação. Sobre esses modelos, o grupo TGM disponibilizou dados fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1.4 Demanda de vapor para processo industrial

Para cálculo da demanda de vapor na rede de produção, foram coletados dados no chão de fábrica como modelo e quantidade de equipamentos. Ea empresa

Dhey Técnica, que é especializada em equipamentos neste processo, forneceu o consumo médio de vapor saturado absorvido.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Estudo de caso

Este marco caracteriza a coleta e o registro de elementos sobre um ou múltiplos casos individualizados, podendo-se elaborar documentos com uma margem de decisões que podem ser tomadas. Desse modo, o estudo de caso pode ser dividido em: Históricos organizacionais, observacionais e histórias de vida (BARROS; LEHFELD, 2000).

Para Oliveira (2017), o estudo de caso é uma averiguação sobre uma situação específica em que são levantados dados essenciais que serviram como alicerce para pesquisas futuras. Afirmar ainda que um trabalho bem elaborado gera discussões sobre concordância ou invalidação das opções encontradas.

A partir desse estudo de caso, o conceito é identificar o problema, analisar evidências, avaliar e propor soluções, entretanto, foram coletados dados no chão de fábrica, assim como foram concretizados os dados coletados através de empresas que forneceram especificações técnicas dos equipamentos. Por fim, foram organizadas combinações entre equipamentos para se obter um resultado teórico, pois, como tais equipamentos são de grande valor agregado, não se é possível fazer simulações reais, por consequência, o resultado final será do método quantitativo (apresentado através de números).

3.2.2 Literaturas

Informações sobre entalpia do fluido, equações e tabelas termodinâmicas foram catalogadas do livro Fundamentos da Termodinâmica do autor Van Wylen, também foram utilizados artigos, publicações e estudos disponibilizados em web sites para os cálculos de demais equações.

3.2.3 Software

Através do programa Excel, edição 2013, foram realizados os cálculos que envolveram equações da termodinâmica, custo do vapor, consumo de combustível, viabilidade econômica entre outras variações.

3.2.4 Conceitos da Viabilidade Econômica

Analisar a viabilidade de um projeto constitui em medir e considerar visões diferentes de desempenhos financeiros de um objeto ou conjunto que entrará em prática. Esse método é iniciado no começo do desenvolvimento do projeto, pois ele é um indicador para a tomada de decisão, no qual já se tem uma estimativa de investimentos e lucros obtidos (MATTE, 2017).

Conforme Gitman (2002), alguns métodos são essenciais para se analisar viabilidade como:

TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR): não é uma medida de lucro, mas serve para que um valor possa ser comparado no tempo. É uma taxa na qual se iguala o valor presente de entrada a um investimento inicial. Para critério de decisão, deve-se averiguar se a TIR for maior ou igual a TMA é critério positivo, caso for menor deve-se rejeitar o projeto. Pode-se calcular a TIR pela equação 01.

$$\$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - II \quad (1)$$

Sendo:

$\$0$ = valor presente líquido;

FC_t = valor presente das entradas de caixa;

TIR = taxa interna de retorno;

II = investimento inicial.

TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA): é a taxa mínima que o investidor deseja ganhar de um investimento, baseada em taxas atuais bancárias.

VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL): é uma ferramenta eficaz na avaliação de um investimento, pois esclarece valor do caixa em função do tempo levando em consideração a taxa de custo capital estipulada. Para critério de decisão, tem-se um ponto positivo somente se o VPL for maior que zero, caso contrário, projeto não é viável. Matematicamente, o VPL é expresso conforme a equação 02.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} - II \quad (2)$$

Sendo:

VPL = valor presente líquido;

FC_t = valor presente das entradas de caixa;

k = taxa do custo capital;

II = investimento inicial.

PAYBACK: é uma ferramenta que indica o prazo necessário para que os fluxos de caixa de entrada coincidam com o custo inicial, podendo ser classificados em duas maneiras, aquele que não considera o custo de Capital da empresa (*payback* simples) e o que considera o custo de Capital da empresa (*payback* descontado).

Neste estudo, o *payback* foi analisado com as seguintes características:

- Range no fluxo de caixa para se aproximar melhor conforme a característica da empresa que apresentar o fluxo aproximado.
- Fixação da quantidade de energia produzida, conforme recomendações do fabricante.
- Valor do TMA (taxa mínima de atratividade) estipulada com conhecimento da taxa Selic.
- Lucro total da produção de energia: foi utilizado para abatimento de custo de energia elétrica derivada de empresa terceira.

Para realização dos cálculos, foi considerado o efeito da inflação conforme o tempo percorrido, no qual influencia diretamente no fluxo de caixa e no valor do custo do combustível da caldeira.

Conforme IBGE (2017), o IPCA (Índice de Preços ao Consumidor Amplo), é o valor oficial da inflação brasileira, entretanto, foi analisado o período de 2003 a 2017 constatando que a variação média foi de 6,6% ao ano.

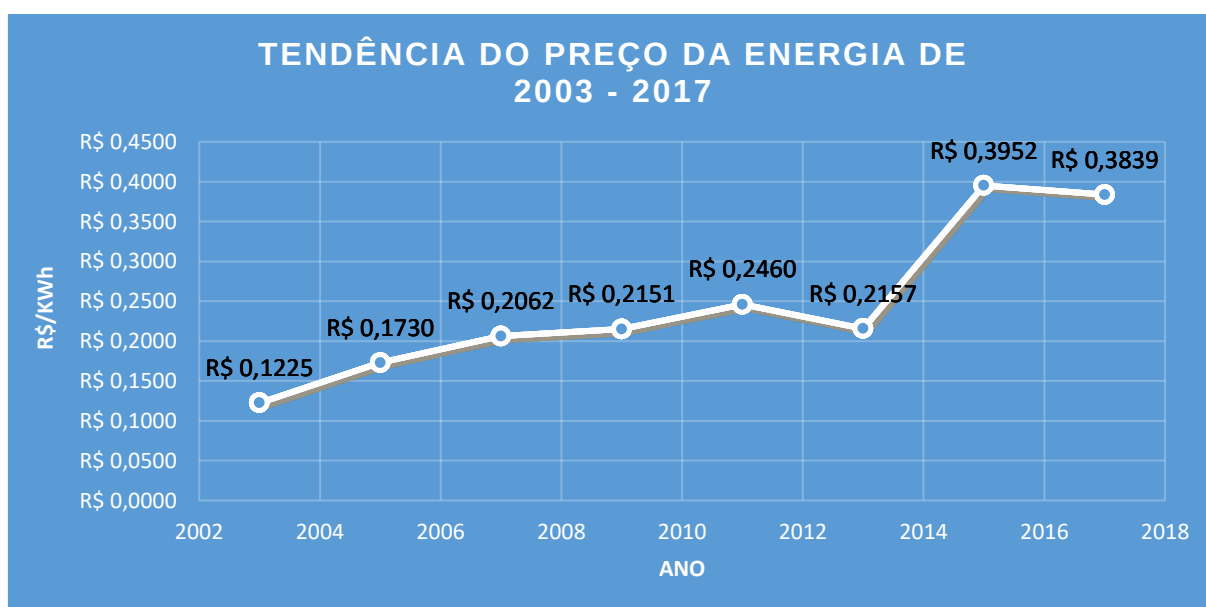
3.2.5 Cálculo da energia elétrica

Para realização dos cálculos de energia elétrica, foram consideradas algumas definições que a empresa está sujeita, parametrizando os cálculos conforme, o regime de trabalho da empresa que dispõe de 24h por dia, 7 dias por semana, 26 dias por mês e 12 meses no ano. O custo foi coletado de uma empresa de médio porte que tem o preço de quilowatt/hora de R\$ 1,847063 no horário de ponta e R\$0,438117 no horário fora de ponta, referência do mês de julho de 2017. Os cálculos referentes ao custo e produção de energia seguem no apêndice A.

Conforme Copel (2017), o horário de ponta ou horário de pico são 3 horas consecutivas, de segunda a sexta-feira, no qual o custo da energia é maior, e essas três horas variam conforme horário de verão e inverno, afirmando ainda que, nos dias que coincidirem com feriados, não é cobrado a taxa de valor de pico.

Para realização do *payback*, o custo da energia foi corrigido conforme características dos históricos de valores obtidos da Aneel, entre os anos de 2003 a 2017, com foco na região sul do país, chegando a uma conclusão que a mesma houve um aumento médio percentual de 4,5% ao ano, conforme Gráfico 6.

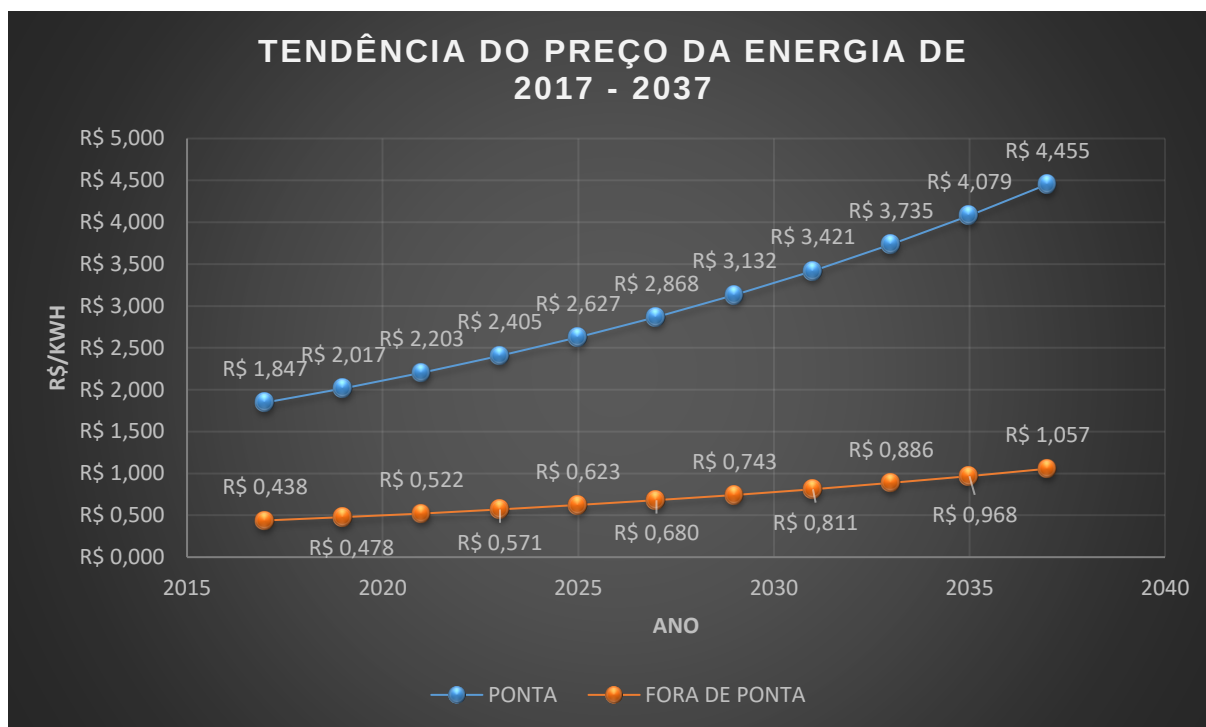
Gráfico 6: Elevação do preço da energia elétrica.



Fonte: adaptado de Aneel (2017).

Com isso, o valor utilizado neste trabalho foi reajustado até a vida útil do equipamento, entre os anos de 2017 a 2037, conforme Gráfico 7.

Gráfico 7: Estimativa do preço da energia elétrica.



Fonte: O autor.

3.2.6 Consumo de combustível da caldeira

Para realização dos cálculos do consumo de combustível da caldeira, primeiramente foi analisada a quantidade de calor fornecido pelo equipamento através da primeira Lei da Termodinâmica que, em sua versão reduzida, é expressa conforme a Equação 3 (VAN HYLEN, 2003).

$$Q = m (h_s - h_e) \quad (3)$$

Sendo:

Q = calor liberador (kJ/h);

m = massa (Kg/h);

h_s = entalpia de saída do fluído;

h_e = entalpia de entrada do fluído.

Depois de se obter o fluxo de calor liberado pela caldeira, foi calculado o consumo de combustível através da Equação 4, (ELETROBRÁS; PROCEL, 2017).

$$\dot{M}_c = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{Pci * n} \quad (4)$$

Sendo:

$\dot{M}_c$ = vazão em massa de combustível (kg/h);

$\dot{m}v$ = vazão em massa de vapor (kg/h);

h_{ae} = entalpia da água de entrada (Kj/Kg);

h_{vs} = entalpia do vapor de saída (Kj/Kg);

Pci = poder calorífico inferior do combustível queimado;

n = rendimento da caldeira.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 DEMANDA DE VAPOR

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa quantitativa nos equipamentos que consomem vapor saturado, os quais são chamados de digestores. Verificou-se que a demanda total de vapor pertence a uma série de digestores de pena que possuem quatro equipamentos do tamanho de 7.500 litros, com um consumo de 1.500Kgv/h cada unidade e outro equipamento com capacidade de 10.000 litros, com um consumo mássico de vapor chegando a 2.000Kgv/h, totalizando cinco equipamentos da linha de pena. Entretanto, no setor de vísceras, há três digestores com disposição de 7.500 litros e ingestão de 2.750Kgv/h, há também outros dois modelos com capacidade de 10.000 litros, e com demanda de vapor de 3.500Kgv/h. Considerando que esses equipamentos trabalham com uma pressão interna entre 5 a 6 bar. Conforme a Tabela 3, pode-se observar a demanda total de vapor exigida pelos digestores.

Tabela 3: Demanda total de vapor

LINHA DE PENA			LINHA DE VISCERAS		
QUANTIDADE	TAMANHO	CONSUMO (Kgv/h)	QUANTIDADE	TAMANHO	CONSUMO (Kgv/h)
1	10.000	2.000	2	10.000	3.500
4	7.500	1.500	3	7.500	2.750
TOTAL		8.000	TOTAL		15.250
CONSUMO TOTAL DE VAPOR					23.250

Fonte: O autor.

Como o processo dessa matéria prima é batelada, ou seja, seu ciclo começa com o carregamento do digestor, na sequência, passa-se pelo processo de cozimento e, em seguida, é descarregado completamente e se reinicia outro ciclo. Por esse motivo, a demanda de vapor e pressão deve existir com uma folga entre o consumo teórico e o valor fornecido, sendo regulado por um controlador.

Desse modo, obtém-se um parâmetro que a turbina deverá fornecer ao sistema térmico que, no mínimo, deve ficar próximo aos 26.000Kgv/h, com uma folga de aproximadamente 11%.

Juntamente com esse processo, foi averiguado o consumo de água de alimentação da caldeira, pois é um fator determinante para o cálculo do consumo de combustível. Através de dados coletados na empresa, resultou-se que, em média, 70,5% do vapor utilizado pela rede industrial volta como condensado para realimentação da caldeira a uma temperatura média de 95°C.

4.2 OPÇÕES DE CALDEIRAS

Conforme analisado o processo na indústria pesquisada, logo foi identificado que o modelo de caldeira atual não atendia a demanda térmica, pois a caldeira fornecia a rede de vapor com aproximadamente 20.000Kgv/h e com acréscimos de equipamentos ao longo da jornada, a caldeira ficou sobrecarregada, por consequência, ocasionava má eficiência em toda rede térmica. Como a substituição da caldeira é necessária, esse trabalho apresentará quatro opções de caldeira. Entre elas, três são para o processo de cogeração. Nas opções abaixo, o consumo de cavaco foi calculado a 45% de umidade.

- Primeira opção: é a opção mais simples, na qual a empresa não adotaria o processo de cogeração, assim, o modelo de caldeira sugerido é SM-30 flamotubular com fornalha aquatubular, ela fornecerá 30.000Kgv/h com uma pressão de 10.6Kgf/cm² a aproximadamente 180°C e o consumo de cavaco de eucalipto é de aproximadamente de 8.890,55Kg/h. A aquisição custa R\$ 5.000.000,00.
- Segunda opção: adota o processo de cogeração com uma caldeira flamotubular com fornalha aquatubular de 30.000Kgv/h por 30Kgf/cm² com vapor superaquecido 360°C e com consumo de cavaco de eucalipto de aproximadamente de 10.179,27Kg/h, tendo um investimento de R\$ 8.700.000,00.
- Terceira opção: Modelo de caldeira aquatubular de 35.000Kgv/h por 42Kgf/cm² com vapor superaquecido de 420°C e consumo de cavaco de eucalipto de 12.229,35Kg/h, com investimento de aproximadamente R\$ 13.600.000,00.
- Quarta opção: Modelo mais promissor para o processo de cogeração, porém, com maior custo de instalação e maior área de projeto, é a

caldeira aquatubular de 35.000Kgv/h por 45Kgf/cm² com vapor superaquecido de 450°C e ingestão de cavaco de eucalipto de 12.503,38Kg/h, com gastos de aproximadamente de R\$ 13.950.000,00.

Os modelos acima de caldeiras foram selecionados pelo motivo de atender a demanda de consumo de vapor, porém, cada opção se comportará diferentemente ao ser acoplada a turbina de vapor.

4.3 OPÇÕES DE TURBINAS A VAPOR

Para o procedimento de cogeração, foram adotadas duas opções de turbina, sendo de características diferentes. As duas alternativas consideradas são da marca TGM pelo fato de facilidade na comunicação e para fornecimento de dados.

Nas opções 1 e 2, obtém-se a turbina em operação conjunta com uma caldeira flamatubular de 30Kgf/cm² por 30.000Kgv/h.

- Primeira opção: A turbina de contrapressão TM Flex tem uma produção menor de energia e com menor custo de instalação. Geralmente trabalham com pressões menores que outros modelos. Esse equipamento trabalha a uma temperatura de 355°C e necessita de um vapor de entrada de 30.000Kgv/h e tem uma pressão de escape de 8.5Kgf/cm² com a mesma vazão de entrada no bocal, seu investimento entre turbina e outros periféricos giram em torno de R \$2.500.000,00.
- Segunda opção: A turbina de condensação com extração TMCE é um modelo que produz mais energia mecânica, porém, tem um maior custo de instalação, por isso, sua principal função é a produção de energia. Entretanto, esse modelo deve ser avaliado minuciosamente, pois necessita de pressões maiores para ter uma extração que atenda o processo industrial. Esse modelo necessita de um vapor de entrada de 26.000Kgv/h, a uma pressão de 30Kgf/cm², com uma temperatura de aproximadamente 360°C, porém, fornecerá à rede industrial 14.000kgv/h com 238°C. Seu custo, entre turbina e periféricos, ficam em torno de R\$ 16.450.000,00.

Para o procedimento, também foi analisado o comportamento das turbinas acopladas a uma caldeira aquatubular. Nessa situação, foram analisadas duas opções, sendo elas:

- Terceira opção: A turbina do modelo TM Flex acoplada com a terceira opção de caldeira, com regime de trabalho de 42Kgf/cm² de pressão e demanda de entrada de vapor com 33.000Kgv/h, gerando um vapor no escape de 8,5kgf/cm² a 270°C, com gastos de R\$ 2.650.000,00.
- Quarta opção: A turbina TMCE em conjunto com a quarta opção de caldeira, trabalhando a uma pressão de 45kgf/cm² e uma vazão mássica de entrada 32.000kgv/h. Esse modelo fornece um vapor na extração de 17.000kgv/h com uma temperatura de aproximadamente 272°C, sendo ela o modelo de turbina mais caro, com valor estipulado em R\$ 20.7000.000,00.

4.4 MODELO DOS EQUIPAMENTOS

Foram administradas as opções coletadas e obteve-se um processo sem cogeração e quatro com sistema de cogeração, conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Detalhes das opções.

OPÇÃO 01 SEM COGERAÇÃO		
CALDEIRA		
CALDEIRA FLAMOTUBULAR / AQUATUBULAR 30.000Kgv/h – 10 Kgf/cm ²		R\$ 5.000.000,00
OPÇÃO 02 COM COGERAÇÃO		
CALDEIRA		
CALDEIRA FLAMOTUBULAR / AQUATUBULAR 30.000Kgv/h – 30 Kgf/cm ²		R\$ 8.700.000,00
TURBINA & REDUTOR		
TMFlex 1.400KW & RTS 250		R\$ 2.500.000,00
GERADOR ELÉTRICO		
Gerador WEG – Linha GPW		R\$ 715.900,00
Gerador 1.750 KVA (1,4KW) / 13,8 kV / 1.800 rpm / Horizontal		
TOTAL		R\$ 11.915.900,00
OPÇÃO 03 COM COGERAÇÃO		
CALDEIRA		
CALDEIRA AQUATUBULAR 35.000Kgv/h – 42 Kgf/cm ²		R\$ 13.600.000,00
TURBINA & REDUTOR		
TMFlex 2.200KW & RTS 280		R\$ 2.650.000,00
GERADOR ELÉTRICO		
Gerador WEG – Linha GPW		R\$ 963.600,00
Gerador 2.750 KVA (2,2KW) / 13,8 kV / 1.800 rpm / Horizontal		
TOTAL		R\$ 17.213.600,00
OPÇÃO 04 COM COGERAÇÃO		
CALDEIRA		
CALDEIRA FLAMOTUBULAR / AQUATUBULAR 30.000Kgv/h – 30 Kgf/cm ²		R\$ 8.700.000,00
TURBINA & REDUTOR		
TMCE 3.000Kw & RTS 320		R\$ 16.450.000,00
GERADOR ELÉTRICO		
Gerador WEG – Linha SPW		R\$ 1.377.100,00
Gerador 3.750 KVA (3KW) / 13,8 kV / 1.800 rpm / Horizontal		
TOTAL		R\$ 26.527.100,00
OPÇÃO 05 COM COGERAÇÃO		
CALDEIRA		
CALDEIRA AQUATUBULAR 35.000Kgv/h – 45 Kgf/cm ²		R\$ 13.950.000,00
TURBINA & REDUTOR		
TMCE 4.730Kw & RTS 360		R\$ 20.700.000,00
GERADOR ELÉTRICO		
Gerador WEG – Linha ST40		R\$ 1.583.100,00
Gerador 5.913 KVA (4,73KW) / 13,8 kV / 1.800 rpm / Horizontal		
TOTAL		R\$ 36.233.100,00

Fonte: O autor.

A seguir, as tabelas mostram as características das opções de cogerações.

Tabela 5: Característica da 2ª opção de cogeração.

Máquina acionada	Gerador			
Modelo da turbina	TMFlex			
Potência nos bornes do gerador	980	1.150	1.400	kW
Pressão de vapor de entrada	29	29	29	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	355	355	355	°C
Vazão de vapor de entrada	22.000	25.000	30.000	kg/h
Pressão de vapor no escape	8,5	8,5	8,5	bar(a)
Temperatura de vapor no escape	250	250	249	°C
Vazão de vapor no escape	22.000	25.000	30.000	kg/h
Rotação da turbina	6.500	6.500	6.500	RPM
Rotação da máquina acionada	1.800	1.800	1.800	RPM

Fonte: O autor.

Tabela 6: Característica da 3ª opção de cogeração.

Máquina acionada	Gerador			
Modelo da turbina	TMFlex			
Potência nos bornes do gerador	1.380	1.700	2.200	kW
Pressão de vapor de entrada	42	42	42	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	415	415	415	°C
Vazão de vapor de entrada	22.000	26.000	33.000	kg/h
Pressão de vapor no escape	8,5	8,5	8,5	bar(a)
Temperatura de vapor no escape	274	270	265	°C
Vazão de vapor no escape	22.000	26.000	33.000	kg/h
Rotação da turbina	6.500	6.500	6.500	RPM
Rotação da máquina acionada	1.800	1.800	1.800	RPM

Fonte: O autor.

Tabela 7: Característica da 4ª opção de cogeração.

Máquina acionada	Gerador	
Modelo da turbina	TMCE	
Potência nos bornes do gerador	3.000	kW
Pressão de vapor de entrada	30	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	360	°C
Vazão de vapor de entrada	26.000	kg/h
Pressão de vapor na extração	8,5	bar(a)
Temperatura de vapor na extração	238	°C
Vazão de vapor na extração	14.000	kg/h
Pressão de vapor no escape	0,1	bar(a)
Temperatura de vapor no escape	45,8	°C
Vazão de vapor no escape	12.000	kg/h
Rotação da turbina	6.500	RPM
Rotação da máquina acionada	1.800	RPM

Fonte: O autor.

Tabela 8: Característica da 5ª opção de cogeração.

Máquina acionada	Gerador	
Modelo da turbina	TMCE	
Potência nos bornes do gerador	4.730	kW
Pressão de vapor de entrada	45	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	450	°C
Vazão de vapor de entrada	32.000	kg/h
Pressão de vapor na extração	8,5	bar(a)
Temperatura de vapor na extração	271,5	°C
Vazão de vapor na extração	17.000	kg/h
Pressão de vapor no escape	0,12	bar(a)
Temperatura de vapor no escape	49,4	°C
Vazão de vapor no escape	15.000	kg/h
Rotação da turbina	6.500	RPM
Rotação da máquina acionada	1.800	RPM

Fonte: O autor.

4.5 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para desenvolvimento do cálculo, primeiramente foram feitas análises de umidade do cavaco de eucalipto. Para isso, foram coletados, no total, quarenta valores

aleatórios durante vinte dias, sendo de uma carga na parte da manhã e outra na parte da tarde. Essas medições foram acompanhadas juntamente com o responsável pela aferição, sendo que o mesmo utiliza um aparelho Marrari modelo M75, conforme a figura 18.

Figura 18: Medidor de Umidade.



Fonte: O autor.

Pode-se observar, na Tabela 9, o valor médio de umidade no cavaco de eucalipto.

Tabela 9: Amostra de cavaco coletado.

Amostra	Umidade em (%)	
	Parte da manhã	Parte da tarde
1	44	43.3
2	44.8	44
3	47.5	46.2

4	46.8	45.5
5	45.2	44.9
6	44.1	43.8
7	46.7	50.3
8	49.5	48.6
9	41.7	43.6
10	45.3	46.9
11	41.5	46
12	44.3	46.8
13	46.5	43.5
14	49	46
15	44.4	46.2
16	46.1	43.6
17	45.4	42,8
18	44.5	46.4
19	46.7	43.7
20	43.5	42,5
Média	44,9 %	

Fonte: O autor.

Através desse valor médio de umidade foi calculado o PCI (Poder Calorífico Inferior) do combustível, o qual está próximo de 45% de umidade, conforme indica a Tabela 10.

Tabela 10: Poder Calorífico do cavaco de eucalipto.

Umidade (%)	PCI (kcal/kg)
0	4.556
10	4.221
20	3.687
30	3.153
40	2.617
50	2.085
60	1.551

Fonte: Zetec (2017).

Conforme Montera (2011), o cálculo de interpolação é uma metodologia para aferir valores mediadores em tabelas, podendo-se obter a ausência de um intervalo

necessário, afirma ainda que é um método para se obter uma função que relaciona as variáveis x e y , conforme a equação 5.

$$f(\mu) \approx P_1(\mu) \approx f_i + (\mu - x_i) \frac{(f_{i+1} - f_i)}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (5)$$

Sendo:

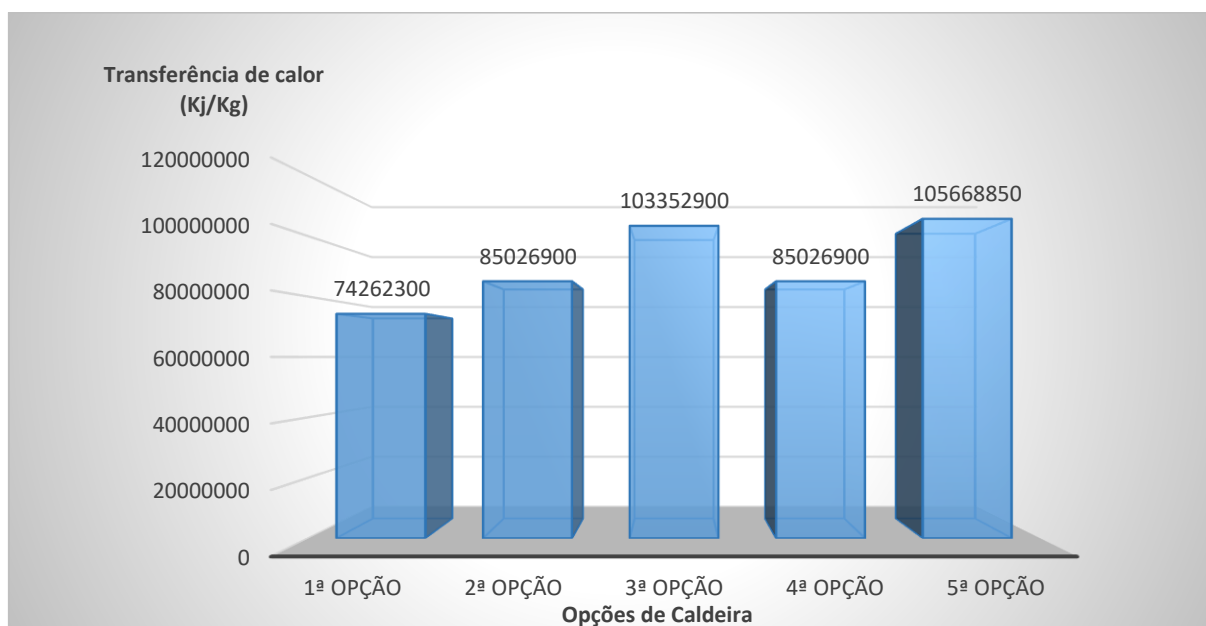
μ = valor desejado;

f_i = valor da função;

x_i = resposta da função.

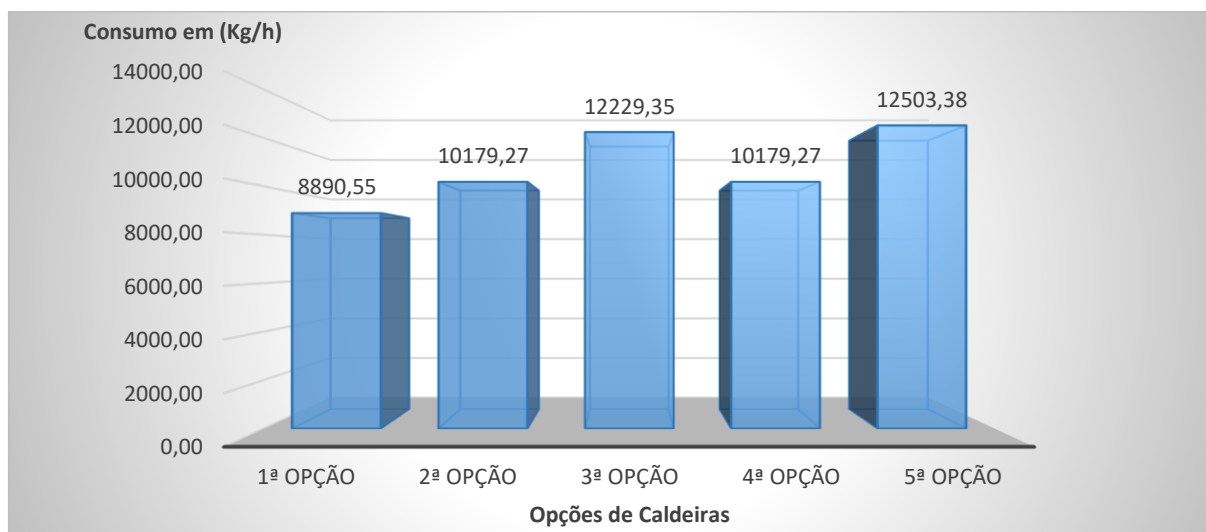
Para um cavaco de eucalipto a 45% de umidade se obteve um PCI no valor de 2350,95 Kcal/Kg ou 9827 Kj/Kg. Aplicando as Equações 3 e 4 para as opções referenciadas de caldeiras, obtêm-se os seguintes valores demonstrados nos Gráficos 6 e 7. Os cálculos mais detalhados seguem no apêndice A.

Gráfico 8: Quantidade de calor fornecido X Opção de caldeira.



Fonte: O autor.

Gráfico 9: Consumo de combustível por opções de caldeiras.



Fonte: O autor.

4.6 CUSTO DO VAPOR

Para o cálculo do custo de geração de vapor, tem-se as variáveis de valor e tipo do combustível que foi fornecido pela empresa, além de considerar a eficiência da caldeira, a temperatura da água de alimentação e pressão de trabalho. Através destas informações, é possível ter um indicador do desempenho da caldeira (ELETROBRÁS; PROCEL, 2017). A Equação 6 define:

$$Custo\ do\ Vapor = \frac{Custo_{comb.} \times Entalpia_{vapor}}{PCI_{comb.} \times \eta_{caldeira}} \quad (6)$$

Sendo:

$Custo_{comb.}$ = Custo do combustível (R\$/t);

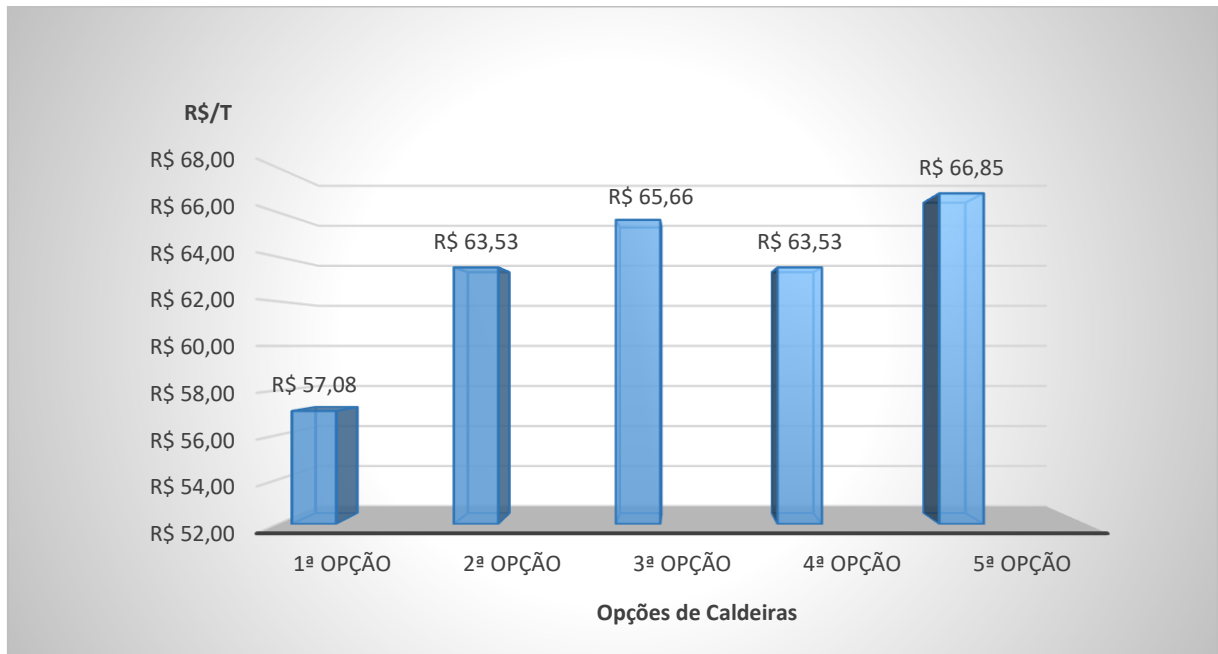
$Entalpia_{vapor}$ = Entalpia do vapor (Kj/kg);

$PCI_{comb.}$ = Poder calorífico inferior do combustível (Kj/kg);

$\eta_{caldeira}$ = Rendimento da caldeira (%).

Assim, pode-se observar o custo da tonelada de vapor no Gráfico 8 e os cálculos detalhados seguem no apêndice B.

Gráfico 10: Custo da tonelada de vapor produzido



Fonte: O autor.

5 RESULTADOS

Através dos dados coletados e cálculos realizados, foram alcançados os resultados do *Payback* descontado. Os seguintes resultados são em função do rendimento dos equipamentos e de sua vida útil. Neste caso, o *payback* foi elaborado em uma estimativa de tempo de 20 anos, levando em conta a inflação no fluxo de caixa e custo do combustível, e a estimativa do preço do KW/h ao longo da jornada.

Primeira opção – Sem cogeração.

- Investimento da Caldeira R\$ 5.000.000,00;
- Consumo de combustível no primeiro ano R\$ 9.985.863,12;
- Fluxo de caixa anual.

Tabela 11: *Payback* da primeira opção.

Fluxo de Caixa no Ano Inicial	<i>Payback</i> Desc.	TIR	VPL	TMA
R\$ 10.000.000,00	Inviável		-R\$ 4.743.686,60	8,5%
R\$ 11.000.000,00	5 anos e 8 meses	26,82%	R\$ 13.387.147,24	8,5%
R\$ 12.000.000,00	2 anos e 9 meses	46,68%	R\$ 31.517.981,08	8,5%
R\$ 13.000.000,00	1 ano e 10 meses	66,35%	R\$ 49.648.814,92	8,5%
R\$ 14.000.000,00	1 ano e 4 meses	86,16%	R\$ 67.779.648,76	8,5%

Fonte: O autor.

Segunda opção – Com cogeração.

- Investimento da Caldeira R\$ 8.700.000,00;
- Total de investimento para cogeração de R\$ 3.215.900,00;
- Consumo de combustível no primeiro ano R\$ 11.433.351,58;
- Produção de energia elétrica no primeiro ano R\$ 5.559.202,90;
- Fluxo de caixa anual.

Tabela 12: *Payback* da segunda opção.

Fluxo de Caixa no Ano Inicial	<i>Payback</i> Desc.	TIR	VPL	TMA
R\$ 10.000.000,00	3 anos e 1 mês	41,63%	R\$ 42.067.342,76	8,5%
R\$ 11.000.000,00	2 anos e 5 meses	50,44%	R\$ 60.198.176,60	8,5%
R\$ 12.000.000,00	2 anos e 1 mês	58,99%	R\$ 78.329.010,44	8,5%
R\$ 13.000.000,00	1 ano e 9 meses	67,43%	R\$ 96.459.844,28	8,5%
R\$ 14.000.000,00	1 ano e 7 meses	75,81%	R\$ 114.590.678,12	8,5%

Fonte: O autor.

Terceira opção – Com cogeração.

- Investimento da Caldeira R\$ 13.600.000,00;
- Total de investimento para cogeração de R\$ 3.613.600,00;
- Consumo de combustível no primeiro ano R\$ 13.736.002,29;
- Produção de energia elétrica no primeiro ano R\$ 8.735.889,15;
- Fluxo de caixa anual.

Tabela 13: *Payback* da terceira opção.

Fluxo de Caixa no Ano Inicial	<i>Payback</i> Desc.	TIR	VPL	TMA
R\$ 10.000.000,00	3 anos e 8 meses	35,42%	R\$ 40.718.437,95	8,5%
R\$ 11.000.000,00	2 anos e 11 meses	41,93%	R\$ 58.849.271,79	8,5%
R\$ 12.000.000,00	2 anos e 7 meses	48,10%	R\$ 76.980.105,63	8,5%
R\$ 13.000.000,00	2 anos e 3 meses	54,10%	R\$ 95.110.939,47	8,5%
R\$ 14.000.000,00	2 anos	60,00%	R\$ 113.241.773,31	8,5%

Fonte: O autor.

Quarta opção – Com cogeração.

- Investimento da Caldeira R\$ 8.700.000,00;
- Total de investimento para cogeração de R\$ 17.827.100,00;
- Consumo de combustível no primeiro ano R\$ 11.433.351,58;
- Produção de energia elétrica no primeiro ano R\$ 11.912.576,11;
- Nessa opção, não há fluxo de caixa, pois a turbina não atende à demanda da fábrica.

Tabela 14: *Payback* da quarta opção.

Fluxo de Caixa no Ano Inicial	<i>Payback</i> Desc.	TIR	VPL	TMA
Sem Fluxo	Inviável		-R\$ 62.456.650,40	8,5%

Fonte: O autor.

Quinta opção – Com cogeração.

- Investimento da Caldeira R\$ 13.950.000,00;
- Total de investimento para cogeração de R\$ 22.283.100,00;
- Consumo de combustível no primeiro ano R\$ 14.043.801,05;
- Produção de energia elétrica no primeiro ano R\$ 18.782.161,76;
- Nessa opção, não há fluxo de caixa, pois a turbina não atende à demanda da fábrica.

Tabela 15: *Payback* da quinta opção.

Fluxo de Caixa no Ano Inicial	<i>Payback</i> Desc.	TIR	VPL	TMA
Sem Fluxo	Inviável		-R\$ 20.670.842,72	8,5%

Fonte: O autor.

Assim, fica claro que esses modelos de turbina de condensação com extração nessas características de demanda de vapor não são adequadas, pois as mesmas não atendem à demanda térmica e seu lucro fica restrito somente à produção de energia elétrica.

Entretanto, se analisada em um processo que a turbina supera a necessidade térmica industrial, essa pode ser de grande utilidade. A primeira simulação abrange a quarta opção, na qual a turbina de condensação com extração tem uma capacidade de 14.000Kg/h.

Quarta opção – Com cogeração.

- Investimento da Caldeira R\$ 8.700.000,00;
- Total de investimento para cogeração de R\$ 17.827.100,00;
- Consumo de combustível no primeiro ano R\$ 11.433.351,58;
- Produção de energia elétrica no primeiro ano R\$ 11.912.576,11;

- Fluxo de caixa reduzido, em função do tamanho da demanda de vapor.

Tabela 16: *Payback* da quarta opção com fluxo de caixa.

Fluxo de Caixa no Ano Inicial	<i>Payback</i> Desc.	TIR	VPL	TMA
R\$ 5.000.000,00	4 anos e 9 meses	24,75%	R\$ 28.197.518,80	8,5%
R\$ 6.000.000,00	4 anos e 2 meses	29,91%	R\$ 46.328.352,64	8,5%
R\$ 7.000.000,00	3 anos e 8 meses	34,47%	R\$ 64.459.186,48	8,5%

Fonte: O autor.

A segunda simulação envolve a quinta opção, na qual a turbina de condensação com extração tem uma disposição de 17.000Kg/h.

Quinta opção – Com cogeração.

- Investimento da Caldeira R\$ 13.950.000,00;
- Total de investimento para cogeração de R\$ 22.283.100,00;
- Consumo de combustível no primeiro ano R\$ 14.043.801,05;
- Produção de energia elétrica no primeiro ano R\$ 18.782.161,76;
- Fluxo de caixa reduzido, em função do tamanho da demanda de vapor.

Tabela 17: *Payback* da quinta opção com fluxo de caixa.

Fluxo de Caixa no Ano Inicial	<i>Payback</i> Desc.	TIR	VPL	TMA
R\$ 5.000.000,00	3 anos e 6 meses	32,81%	R\$ 69.983.326,49	8,5%
R\$ 6.000.000,00	3 anos e 5 meses	36,10%	R\$ 88.114.160,33	8,5%
R\$ 7.000.000,00	3 anos e 2 meses	39,24%	R\$ 106.244.994,17	8,5%

Fonte: O autor.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise de como o sistema de cogeração funciona em conjunto com o fluxo econômico do setor empresarial, pois, todo tipo de empresa busca a redução de custo e, neste trabalho, o conceito principal foi diminuir o custo de energia elétrica e ampliar o conhecimento no processo de empresas que possuem um sistema de geração de vapor.

De modo geral, percebe-se que o custo para se gerar energia elétrica através do combustível que não seja oriundo de resíduos da produção da fábrica, é muito expressivo, pois o mesmo é considerado um dos principais gastos no orçamento das empresas, com isso, nem todas as possibilidades de cogeração são atrativas, levando em conta que algumas nem apresentam retorno financeiro. Entretanto, sistemas de cogeração mais compactos produzem menos energia elétrica, porém, não é necessário um investimento de grande valor. Nota-se também que nem todos os tipos de turbinas são atrelados ao processo de cogeração com a rede industrial. Turbinas de contrapressão geram menos energia, porém, são mais fáceis de se interligar com o processo fabril, pois, por sua característica, atingem maiores vazões de vapor em sua pressão de escape. Já na turbina de condensação com extração, gera-se grande quantidade de energia, porém, tem-se uma parcela de vapor descartada na saída de escape.

Considerando as informações obtidas e apresentadas nessa pesquisa, nesse estudo do sistema de cogeração, ficou evidente que a caldeira do modelo Flamotubular com fornalha Aquatubular, e as caldeiras Aquatubulares atendem à demanda de vapor industrial. Entretanto o modelo Aquatubular tem um maior consumo de combustível, devido a sua maior capacidade de pressão e vazão. O processo da transformação da energia térmica para energia mecânica foi obtido somente com as turbinas de contrapressão do modelo TMFlex 1.400Kwh e 2.200Kwh, pois a turbina de condensação com extração TMCE não atende à demanda térmica da indústria. O gerador elétrico da linha GPW de 1.750 KVA e 2.750 KVA suportam as potências das turbinas.

Cada opção de cogeração apresentou um *payback*. A opção sem cogeração necessita de um tempo maior em relação às outras. Já o sistema com cogeração, calculou-se que o maior tempo ficou com 3 anos e 8 meses e o menor com 1 ano e 7

meses, entretanto, com lucros futuros distintos. Assim, ampliando o conhecimento de pessoas e empresas que pertencem a essa área de atuação.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a variação de *payback* com outros tipos de combustíveis;
- Calcular a eficácia de uma turbina de condensação com extração, relacionando sua capacidade de energia elétrica com a capacidade de energia térmica oferecida a rede industrial;
- Verificar a disponibilidade e eventuais contratempos em fornecer energia no mercado livre, com intuito de vender o possível excedente;
- Indicar pontos críticos como: tratamento de água, manutenções e cuidados ao trabalhar com turbinas a vapor.

REFERÊNCIAS

ABM, **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**: 2008. Nota técnica TR 04^a: Biomassa da Madeira para Siderurgia. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 18p.

ALVES C.S. **Sistemas Térmicos**: Geradores de água quente. Maringá. UEM/Departamento de engenharia Química, 2002, 29p.

AMBIENTE ENERGIA. **Biomassa e as Energias Renováveis crescem mesmo com a crise e dificuldades**, 2016. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/01/biomassa-e-energias-renovaveis-crescem-mesmo-com-crise-e-dificuldades/27806>>. Acesso em 05 set. 2017.

ANEEL, **Parte II Fontes Renováveis**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf> Acesso em 01 mai. 2017.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa Média por Classe de Consumo e por Região**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acesso em: 26 out. 2017.

ANTONIO, **Segurança do Trabalho ACZ**. 2014. Disponível em: <<http://www.seguranca dotrabalhoacz.com.br/resumo-nr-13/>> Acesso em 26 mar. 2017.

AVELINO, J.A. **Modelagem e avaliação de extensão da vida útil de plantas industriais**: Estudo de caso: Geração elétrica em Plataformas Marítimas de Produção de Petróleo. 2008. 160p. Tese (Doutor em Modelagem computacional), Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2008.

AZEVEDO, J. **Apontamentos sobre Cogeração**. [s.l.] Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, 2000, 11p.

BARROS; LEHFELD. **Fundamentos de Metodologia Científica**. Um guia para iniciação científica. 2.ed. Ampliada. Editora: ERJ Informática Ltda.

BAZZO, Edson. **Geradores de Vapor**. 2 ed. Florianópolis UFSC, 1995, 216p.

BEM. **Balanço Energético Nacional – Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em < <http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>>. Acesso em 15 set. 2017.

BRASIL, ANEEL. **Apostila de Co-geração**, Curso de Engenharia de Equipamentos, Edição de Agosto, 2005, p 35. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/dulcemar/doc_pdf/apostila_cogeraacao_otima.pdf>. Acesso em 12 mar. 2017.

BRASIL, ANEEL. **Agência Nacional de Energia elétrica**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/003/documento/minuta_resolucao.pdf> Acesso em: 16 mar. 2017.

BRASIL. ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em 05 abr. 2017.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 13** - Norma Regulamentadora nº 13 Caldeiras e vasos de pressão. Portaria TEM 594/2014. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr13.htm>>. Acessado em 01 de maio.2017.

COBAS, V., **Geração Distribuída**, FUPAI, Co-geração e Geração Distribuída, cap.10, Itajubá, MG, 2001.

COPEL. **Tarifas de Energia da Copel.** Disponível em <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a103257100064b22e%2Fb2f4a2f0687eb6cf03257488005939b9>>. Acesso em 10 out. 2017.

COPEL, **Gerador Elétrico.** 2017. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F40A0E2ABD99123CF0325740C00496689>> Acesso em 10 mai. 2017.

CORREIA NETO, V., **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar e Gás Natural**, Tese de Mestrado, COPPE, IFRJ. Rio de Janeiro, 2001. 174p.

DALL'ORTO, G. **Geradores de vapor.** CEFETES – Unidade de São Mateus. Espírito Santo. 84p. [s.d].

ELEKTRO. **Eficiência Energética, Segmento Industrial.** São Paulo. Disponível em: <https://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO_DE_VAPOR_E_CALOR.pdf> Acesso em 01 mai. 2017.

ELEKTRO. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações.** Universidade Federal de Itajubá, Campinas-Sp, 2012, 315p. Disponível em: <file:///F:/REFERENCIAS/ Livro_Eficiencia_Energetica.pdf> Acesso em 13 mai. 2017.

ELETROBRÁS, **Plano Decenal de Expansão 2000/2009**, GCPS – Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos, Rio de Janeiro, 2000.

ENGEMA, Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. **Viabilidade de implantação de uma caldeira para cogeração de energia a partir da biomassa**, 16p. [s.d.].

FRANÇA, A; CASEIRO, L. **Cogeração e Trigerção**, Eng^a. Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra. Portugal, 2007/2008. 45p.

GITMAN, L. **Princípios de administração financeira.** 7.ed. Editora Harbra, 2002, 840p.

HD ENERGIA VERDE. **Apostila sobre Eficiência Energética em Sistemas de Vapor:** Curso de Eficiência Energética. 2017. 115p. Disponível em: <http://www.hdenergiaverde.com/hd/sites/default/files/upload/Apostila_Eficiencia_Energetica_em_Sistemas_de_Vapor.pdf>. Acesso em: 05 out. 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IPCA.** Disponível em: <https://www2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm>. Acesso em: 27 out. 2017.

LORA, E.E.S.; NASCIMENTO, M.A.R. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação**- Volume 1. 1^a ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

MACEDO, I. **Estado da arte e tendências tecnológicas para energia.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, 2003, 90p.

MACEDO, I. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento.** Brasília: CGEE, 2001, 10p.

MACHADO, M. **Turbinas**, 2010. Disponível em:<<http://www.webartigos.com/artigos/turbinas/32834/>>. Acesso em 22 abr.2017.

MARTINELLI, L. **Geradores de Vapor.** UNIJUÍ, Panambi RS .2003, 141p.

MARTINELLI, L. **Máquinas Térmicas II**. UNIJUÍ: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2002. 135p.

MATTE, D. **Administração Financeira e Orçamentária II** - Apostila 02: Técnicas de Orçamento de Capital, 2017, 23p.

MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. 9.ed. São Paulo: Editora: Érica, 2008. 375p. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/alexfabianobueno1/elementos-de-maquinas-sarkis-melconian-32426060>> Acesso em 30 abr. 2017.

MENESES, E. **O uso de turbinas a gás para cogeração de energia elétrica em plataformas**. Centro Universitário Estadual da Zona Oeste. Rio de Janeiro, 2011. 48p.

MENEZES, F. **Estudo de Planta de Cogeração com Caldeira de Recuperação Bi-Combustível com queima de gás natural e óleo ultra viscoso**. 2009. 10p.

MME. Ministério De Minas E Energia – **Boletins de Energia**. Governo do Brasil, 2017. Disponível em <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes-e-indicadores/boletins-mensais-de-energia>>. Acesso em 05 out. 2017.

MONTERA, L. **Interpolação**. Faculdade de Computação – Facom/UFMS, 2017, 25p. Disponível em <http://www.facom.ufms.br/~montera/Interpolacao_alunos.pdf>. Acesso em 25 set. 2017.

MSPC, **Ciclo de Rankine**, 2017. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/termo/termo0540.shtml#rankine>>. Acesso em 07 mai. 2017.

MTE – Ministério de Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora Nº 13**: Caldeiras, vasos de pressão e tubulações. Portaria MTb n.º 1.084, de 28 de setembro de 2017. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-13-caldeiras-vasos-de-pressao-e-tubulacoes>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

MULLER, M. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. Viçosa, Minas Gerais, 2005. 108p.

NOGUEIRA, L.; MARTINS, A. **Introdução à cogeração**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1997.

PAIVA, O. **Turbinas a Vapor**. Tecnologia di Calor II – MEC 4028-2. Fundação Técnico Educacional Souza Marques. Rio de Janeiro. 2007. 92p.

PANOSSO, G. **Métodos de Simulação para Ciclos de Rankine**, Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, PROMEC, Porto Alegre 2003 184p.

PORTAL EDUCARBRASIL, **A história da termodinâmica, suas leis e aplicações**. Disponível em: <<http://marcosgeograficos.com.br/pdf/html.php?id=96>>. Acessado em: 18 de mar. 2017.

PROCEL; ELETROBRÁS, **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro 2005. 196p.

RIPOLI, T.; RIPOLI, M. **Biomassa de cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Edição dos Autores, 2009. 333p.

SANTOS, F. **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade**. São Paulo, 2012. 127p.

SANTOS, F.; NOVO, L. **Fundamentos Teóricos Relacionado à Cogeração e o Exemplo da Central de Cogeração Infoglobo**. Rio de Janeiro, 2008. 189p.

SILVA, N. **Turbinas a Vapor e a Gás**. Ed[S.I.], 1995. 170p.

STRAMBI, R. **Otimização de planta supercrítica em usinas de açúcar e álcool**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. 41p.

STROBEL, C., **Máquinas Térmicas I**, Ciclos térmicos a vapor, Universidade Federal do Paraná. 9p. Disponível em < http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM364/Material%20de%20Aula/Aula%2001%20-%20Ciclos%20T%E9rmicos%20a%20Vapor%20-%20M%E1quinas%20T%E9rmicas%20I.pdf>. Acesso em 02 mai. 2017.

OLIVEIRA, E., **Estudo de caso**, InfoEscola. Disponível em <<http://www.infoescola.com/sociedade/estudo-de-caso/>>. Acesso em 23 jul. 2017

TECNOGERA, **Gerador de energia**, 2015. Disponível em: <<http://www.tecnogera.com.br/blog/voce-sabe-o-que-sao-geradores/>>. Acesso em 04 maio.2017.

WYLEN, V. **Fundamentos da Termodinamica**. 6.ed. Editora: Edgard Blucher, 2003, 581p.

Anexo A – Estimativa de preço do KW/h

ANO	PONTA	FORA DE PONTA
2017	R\$ 1,847	R\$ 0,438
2018	R\$ 1,930	R\$ 0,458
2019	R\$ 2,017	R\$ 0,478
2020	R\$ 2,108	R\$ 0,500
2021	R\$ 2,203	R\$ 0,522
2022	R\$ 2,302	R\$ 0,546
2023	R\$ 2,405	R\$ 0,571
2024	R\$ 2,514	R\$ 0,596
2025	R\$ 2,627	R\$ 0,623
2026	R\$ 2,745	R\$ 0,651
2027	R\$ 2,868	R\$ 0,680
2028	R\$ 2,998	R\$ 0,711
2029	R\$ 3,132	R\$ 0,743
2030	R\$ 3,273	R\$ 0,776
2031	R\$ 3,421	R\$ 0,811
2032	R\$ 3,575	R\$ 0,848
2033	R\$ 3,735	R\$ 0,886
2034	R\$ 3,904	R\$ 0,926
2035	R\$ 4,079	R\$ 0,968
2036	R\$ 4,263	R\$ 1,011
2037	R\$ 4,455	R\$ 1,057

Anexo B – Tabela Termodinâmica

Tabela B.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1.1												
Água saturada: tabela em função da temperatura												
Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	418,92	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295
125	232,1	0,001065	0,77059	524,72	2009,91	2534,63	524,96	2188,50	2713,46	1,5812	5,4962	7,0774
130	270,1	0,001070	0,66850	546,00	1993,90	2539,90	546,29	2174,16	2720,46	1,6343	5,3925	7,0269
135	313,0	0,001075	0,58217	567,34	1977,69	2545,03	567,67	2159,59	2727,26	1,6869	5,2907	6,9777
140	361,3	0,001080	0,50885	588,72	1961,30	2550,02	589,11	2144,75	2733,87	1,7390	5,1908	6,9298
145	415,4	0,001085	0,44632	610,16	1944,69	2554,86	610,61	2129,65	2740,26	1,7906	5,0926	6,8832
150	475,9	0,001090	0,39278	631,66	1927,87	2559,54	632,18	2114,26	2746,44	1,8417	4,9960	6,8378
155	543,1	0,001096	0,34676	653,23	1910,82	2564,04	653,82	2098,56	2752,39	1,8924	4,9010	6,7934
160	617,8	0,001102	0,30706	674,85	1893,52	2568,37	675,53	2082,55	2758,09	1,9426	4,8075	6,7501
165	700,5	0,001108	0,27269	696,55	1875,97	2572,51	697,32	2066,20	2763,53	1,9924	4,7153	6,7078
170	791,7	0,001114	0,24283	718,31	1858,14	2576,46	719,20	2049,50	2768,70	2,0418	4,6244	6,6663
175	892,0	0,001121	0,21680	740,16	1840,03	2580,19	741,16	2032,42	2773,58	2,0909	4,5347	6,6256
180	1002,2	0,001127	0,19405	762,08	1821,62	2583,70	763,21	2014,96	2778,16	2,1395	4,4461	6,5857

Tabela B.1.1 (continuação)

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
185	1122,7	0,001134	0,17409	784,08	1802,90	2586,98	785,36	1997,07	2782,43	2,1878	4,3586	6,5464
190	1254,4	0,001141	0,15654	806,17	1783,84	2590,01	807,61	1978,76	2786,37	2,2358	4,2720	6,5078
195	1397,8	0,001149	0,14105	828,36	1764,43	2592,79	829,96	1959,99	2789,96	2,2835	4,1863	6,4697
200	1553,8	0,001156	0,12736	850,64	1744,66	2595,29	852,43	1940,75	2793,18	2,3308	4,1014	6,4322
205	1723,0	0,001164	0,11521	873,02	1724,49	2597,52	875,03	1921,00	2796,03	2,3779	4,0172	6,3951
210	1906,3	0,001173	0,10441	895,51	1703,93	2599,44	897,75	1900,73	2798,48	2,4247	3,9337	6,3584
215	2104,2	0,001181	0,09479	918,12	1682,94	2601,06	920,61	1879,91	2800,51	2,4713	3,8507	6,3221
220	2317,8	0,001190	0,08619	940,85	1661,49	2602,35	943,61	1858,51	2802,12	2,5177	3,7683	6,2860
225	2547,7	0,001199	0,07849	963,72	1639,58	2603,30	966,77	1836,50	2803,27	2,5639	3,6863	6,2502
230	2794,9	0,001209	0,07158	986,72	1617,17	2603,89	990,10	1813,85	2803,95	2,6099	3,6047	6,2146
235	3060,1	0,001219	0,06536	1009,88	1594,24	2604,11	1013,61	1790,53	2804,13	2,6557	3,5233	6,1791
240	3344,2	0,001229	0,05976	1033,19	1570,75	2603,95	1037,31	1766,50	2803,81	2,7015	3,4422	6,1436
245	3648,2	0,001240	0,05470	1056,69	1546,68	2603,37	1061,21	1741,73	2802,95	2,7471	3,3612	6,1083
250	3973,0	0,001251	0,05013	1080,37	1522,00	2602,30	1085,34	1716,18	2801,52	2,7927	3,2802	6,0729
255	4319,5	0,001263	0,04598	1104,26	1496,66	2600,93	1109,72	1689,80	2799,51	2,8382	3,1992	6,0374
260	4688,6	0,001276	0,04220	1128,37	1470,64	2599,01	1134,35	1662,54	2796,89	2,8837	3,1181	6,0018
265	5081,3	0,001289	0,03877	1152,72	1443,87	2596,60	1159,27	1634,34	2793,61	2,9293	3,0368	5,9661
270	5498,7	0,001302	0,03564	1177,33	1416,33	2593,66	1184,49	1605,16	2789,65	2,9750	2,9551	5,9301
275	5941,8	0,001317	0,03279	1202,23	1387,94	2590,17	1210,05	1574,92	2784,97	3,0208	2,8730	5,8937
280	6411,7	0,001332	0,03017	1227,43	1358,66	2586,09	1235,97	1543,55	2779,53	3,0667	2,7903	5,8570
285	6909,4	0,001348	0,02777	1252,98	1328,41	2581,38	1262,29	1510,97	2773,27	3,1129	2,7069	5,8198
290	7436,0	0,001366	0,02557	1278,89	1297,11	2575,99	1289,04	1477,08	2766,13	3,1593	2,6227	5,7821
295	7992,8	0,001384	0,02354	1305,21	1264,67	2569,87	1316,27	1441,78	2758,05	3,2061	2,5375	5,7436
300	8581,0	0,001404	0,02167	1331,97	1230,99	2562,96	1344,01	1404,93	2748,94	3,2533	2,4511	5,7044
305	9201,8	0,001425	0,01995	1359,22	1195,94	2555,16	1372,33	1366,38	2738,72	3,3009	2,3633	5,6642
310	9856,6	0,001447	0,01835	1387,03	1159,37	2546,40	1401,29	1325,97	2727,27	3,3492	2,2737	5,6229
315	10547	0,001472	0,01687	1415,44	1121,11	2536,55	1430,97	1283,48	2714,44	3,3981	2,1821	5,5803
320	11274	0,001499	0,01549	1444,55	1080,93	2525,48	1461,45	1238,64	2700,08	3,4479	2,0882	5,5361
325	12040	0,001528	0,01420	1474,44	1038,57	2513,01	1492,84	1191,13	2683,97	3,4987	1,9913	5,4900
330	12845	0,001561	0,01300	1505,24	993,66	2498,91	1525,29	1140,56	2665,85	3,5506	1,8909	5,4416
335	13694	0,001597	0,01186	1537,11	945,77	2482,88	1558,98	1086,37	2645,35	3,6040	1,7863	5,3903
340	14586	0,001638	0,01080	1570,26	894,26	2464,53	1594,15	1027,86	2622,01	3,6593	1,6763	5,3356
345	15525	0,001685	0,00978	1605,01	838,29	2443,30	1631,17	964,02	2595,19	3,7169	1,5594	5,2763
350	16514	0,001740	0,00881	1641,81	776,58	2418,39	1670,54	893,38	2563,92	3,7776	1,4336	5,2111
355	17554	0,001807	0,00787	1681,41	707,11	2388,52	1713,13	813,59	2526,72	3,8427	1,2951	5,1378
360	18651	0,001892	0,00694	1725,19	626,29	2351,47	1760,48	720,52	2481,00	3,9146	1,1379	5,0525
365	19807	0,002011	0,00599	1776,13	526,54	2302,67	1815,96	605,44	2421,40	3,9983	0,9487	4,9470
370	21028	0,002213	0,00493	1843,84	384,69	2228,53	1890,37	441,75	2332,12	4,1104	0,6868	4,7972
374,1	22089	0,003155	0,00315	2029,58	0,00	2029,58	2099,26	0,00	2099,26	4,4297	0,0000	4,4297

Tabela B.1.2

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
<i>P</i>	<i>T</i>	<i>v_l</i>	<i>v_v</i>	<i>u_l</i>	<i>u_{lv}</i>	<i>u_v</i>	<i>h_l</i>	<i>h_{lv}</i>	<i>h_v</i>	<i>s_l</i>	<i>s_{lv}</i>	<i>s_v</i>
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0,0000	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501
15	53,97	0,001014	10,02218	225,90	2222,83	2448,73	225,91	2373,14	2599,06	0,7548	7,2536	8,0084
20	60,06	0,001017	7,64937	251,35	2205,36	2456,71	251,38	2358,33	2609,70	0,8319	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,20424	271,88	2191,21	2463,08	271,90	2346,29	2618,19	0,8930	6,9383	7,8313
30	69,10	0,001022	5,22918	289,18	2179,22	2468,40	289,21	2336,07	2625,28	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001026	3,99345	317,51	2159,49	2477,00	317,55	2319,19	2636,74	1,0258	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,24034	340,42	2143,43	2483,85	340,47	2305,40	2645,87	1,0910	6,5029	7,5939
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843
150	111,37	0,001053	1,15933	466,92	2052,72	2519,64	467,08	2226,46	2693,54	1,4335	5,7897	7,2232
175	116,06	0,001057	1,00363	486,78	2038,12	2524,90	486,97	2213,57	2700,53	1,4848	5,6868	7,1717
200	120,23	0,001061	0,88573	504,47	2025,02	2529,49	504,68	2201,96	2706,63	1,5300	5,5970	7,1271
225	124,00	0,001064	0,79325	520,45	2013,10	2533,56	520,69	2191,35	2712,04	1,5705	5,5173	7,0878
250	127,43	0,001067	0,71871	535,08	2002,14	2537,21	535,34	2181,55	2716,89	1,6072	5,4455	7,0526
275	130,60	0,001070	0,65731	548,57	1991,95	2540,53	548,87	2172,42	2721,29	1,6407	5,3801	7,0208
300	133,55	0,001073	0,60582	561,13	1982,43	2543,55	561,45	2163,85	2725,30	1,6717	5,3201	6,9918
325	136,30	0,001076	0,56201	572,88	1973,46	2546,34	573,23	2155,76	2728,99	1,7005	5,2646	6,9651
350	138,88	0,001079	0,52425	583,93	1964,98	2548,92	584,31	2148,10	2732,40	1,7274	5,2130	6,9404
375	141,32	0,001081	0,49137	594,38	1956,93	2551,31	594,79	2140,79	2735,58	1,7527	5,1647	6,9174
400	143,63	0,001084	0,46246	604,29	1949,26	2553,55	604,73	2133,81	2738,53	1,7766	5,1193	6,8958
450	147,93	0,001088	0,41398	622,75	1934,87	2557,62	623,24	2120,67	2743,91	1,8206	5,0359	6,8565
500	151,86	0,001093	0,37489	639,66	1921,57	2561,23	640,21	2108,47	2748,67	1,8606	4,9606	6,8212
550	155,48	0,001097	0,34268	655,30	1909,17	2564,47	655,91	2097,04	2752,94	1,8972	4,8920	6,7892
600	158,85	0,001101	0,31567	669,88	1897,52	2567,40	670,54	2086,26	2756,80	1,9311	4,8289	6,7600
650	162,01	0,001104	0,29268	683,55	1886,51	2570,06	684,26	2076,04	2760,30	1,9627	4,7704	6,7330
700	164,97	0,001108	0,27286	696,43	1876,07	2572,49	697,20	2066,30	2763,50	1,9922	4,7158	6,7080
750	167,77	0,001111	0,25560	708,62	1866,11	2574,73	709,45	2056,89	2766,43	2,0199	4,6647	6,6846
800	170,43	0,001115	0,24043	720,20	1856,58	2576,79	721,10	2048,04	2769,13	2,0461	4,6166	6,6627

Tabela B.1.2 (continuação)

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
<i>P</i>	<i>T</i>	<i>v_f</i>	<i>v_g</i>	<i>u_f</i>	<i>u_{fg}</i>	<i>u_g</i>	<i>h_f</i>	<i>h_{fg}</i>	<i>h_g</i>	<i>s_f</i>	<i>s_{fg}</i>	<i>s_g</i>
850	172,96	0,001118	0,22698	731,25	1847,45	2578,69	732,20	2039,43	0,2771,63	2,0709	4,5711	6,6421
900	175,38	0,001121	0,21497	741,81	1838,65	2580,46	742,82	2031,12	2773,94	2,0946	4,5280	6,6225
950	177,69	0,001124	0,20419	751,94	1830,17	2582,11	753,00	2023,08	2776,08	2,1171	4,4869	6,6040
1000	179,91	0,001127	0,19444	761,67	1821,97	2583,64	762,79	2015,29	2778,08	2,1386	4,4478	6,5864
1100	184,09	0,001133	0,17753	780,08	1806,32	2586,40	781,32	2000,36	2781,68	2,1791	4,3744	6,5535
1200	187,99	0,001139	0,16333	797,27	1791,55	2588,82	798,64	1986,19	2784,82	2,2165	4,3067	6,5233
1300	191,64	0,001144	0,15125	813,42	1777,53	2590,95	814,91	1972,67	2787,58	2,2514	4,2438	6,4953
1400	195,07	0,001149	0,14084	828,68	1764,15	2592,83	830,29	1959,72	2790,00	2,2842	4,1850	6,4692
1500	198,32	0,001154	0,13177	843,14	1751,30	2594,50	844,87	1947,28	2792,15	2,3150	4,1298	6,4448
1750	205,76	0,001166	0,11349	876,44	1721,39	2597,83	878,48	1917,95	2796,43	2,3851	4,0044	6,3895
2000	212,42	0,001177	0,09963	906,42	1693,84	2600,26	908,77	1890,74	2799,51	2,4473	3,8935	6,3408
2250	218,45	0,001187	0,08875	933,81	1668,18	2601,98	936,48	1865,19	2801,67	2,5034	3,7938	6,2971
2500	223,99	0,001197	0,07998	959,09	1644,04	2603,13	962,09	1840,98	2803,07	2,5546	3,7028	6,2574
2750	229,12	0,001207	0,07275	982,65	1621,16	2603,81	985,97	1817,89	2803,86	2,6018	3,6190	6,2208
3000	233,90	0,001216	0,06668	1004,76	1599,34	2604,10	1008,41	1795,73	2804,14	2,6456	3,5412	6,1869
3250	238,38	0,001226	0,06152	1025,62	1578,43	2604,04	1029,60	1774,37	2803,97	2,6866	3,4685	6,1551
3500	242,60	0,001235	0,05707	1045,41	1558,29	2603,70	1049,73	1753,70	2803,43	2,7252	3,4000	6,1252
4000	250,40	0,001252	0,04978	1082,28	1519,99	2602,27	1087,29	1714,09	2801,38	2,7963	3,2737	6,0700
5000	263,99	0,001286	0,03944	1147,78	1449,34	2597,12	1154,21	1640,12	2794,33	2,9201	3,0532	5,9733
6000	275,64	0,001319	0,03244	1205,41	1384,27	2589,69	1213,32	1571,00	2784,33	3,0266	2,8625	5,8891
7000	285,88	0,001351	0,02737	1257,51	1322,97	2580,48	1266,97	1505,10	2772,07	3,1210	2,6922	5,8132
8000	295,06	0,001384	0,02352	1305,54	1264,25	2569,79	1316,61	1441,33	2757,94	3,2067	2,5365	5,7431
9000	303,40	0,001418	0,02048	1350,47	1207,28	2557,75	1363,23	1378,88	2742,11	3,2857	2,3915	5,6771
10000	311,06	0,001452	0,01803	1393,00	1151,40	2544,41	1407,53	1317,14	2724,67	3,3595	2,2545	5,6140
11000	318,15	0,001489	0,01599	1433,68	1096,06	2529,74	1450,05	1255,55	2705,60	3,4294	2,1233	5,5527
12000	324,75	0,001527	0,01426	1472,92	1040,76	2513,67	1491,24	1193,59	2684,83	3,4961	1,9962	5,4923
13000	330,93	0,001567	0,01278	1511,09	984,99	2496,08	1531,46	1130,76	2662,22	3,5604	1,8718	5,4323
14000	336,75	0,001611	0,01149	1548,53	928,23	2476,76	1571,08	1066,47	2637,55	3,6231	1,7485	5,3716
15000	342,24	0,001658	0,01034	1585,58	869,85	2455,43	1610,45	1000,04	2610,49	3,6847	1,6250	5,3097
16000	347,43	0,001711	0,00931	1622,63	809,07	2431,70	1650,00	930,59	2580,59	3,7460	1,4995	5,2454
17000	352,37	0,001770	0,00836	1660,16	744,80	2404,96	1690,25	856,90	2547,15	3,8078	1,3698	5,1776
18000	357,06	0,001840	0,00749	1698,86	675,42	2374,28	1731,97	777,13	2509,09	3,8713	1,2330	5,1044
19000	361,54	0,001924	0,00666	1739,87	598,18	2338,05	1776,43	688,11	2464,54	3,9387	1,0841	5,0227
20000	365,81	0,002035	0,00583	1785,47	507,58	2293,05	1826,18	583,56	2409,74	4,0137	0,9132	4,9269
21000	369,89	0,002206	0,00495	1841,97	388,74	2230,71	1888,30	446,42	2334,72	4,1073	0,6942	4,8015
22000	373,80	0,002808	0,00353	1973,16	108,24	2081,39	2034,92	124,04	2158,97	4,3307	0,1917	4,5224
22089	374,14	0,003155	0,00315	2029,58	0,00	2029,58	2099,26	0,00	2099,26	4,4297	0,0000	4,4297

APÊNDICE A

VALOR DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA ANUALMENTE - 2ª OPÇÃO					
HORÁRIO	VARIAÇÃO DO VALOR (R\$)	HORAS	DIAS	KW	TOTAL MÊS
PONTA	CONFORME ANEXO A	3	22	1400	= R\$ * horas * dias * Kw
FORA PONTA	CONFORME ANEXO A	21	22	1400	= R\$ * horas * dias * Kw
FORA PONTA	CONFORME ANEXO A	24	4	1400	= R\$ * horas * dias * Kw
TOTAL					$\sum TOTAL\ MÊS$
FERIADOS QUE NÃO COMBRAM HORARIO DE PONTA NO ANO					TOTAL NO ANO
PONTA	CONFORME ANEXO A	3	8	1400	= R\$ * horas * dias * Kw
GERANDO UM TOTAL ANUAL DE:					
		$Total = \left(\sum TOTAL\ MÊS \times 12 \right) - TOTAL\ NO\ ANO$			

VALOR DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA ANUALMENTE - 3ª OPÇÃO					
HORÁRIO	VARIAÇÃO DO VALOR (R\$)	HORAS	DIAS	KW	TOTAL MÊS
PONTA	CONFORME ANEXO A	3	22	2200	= R\$ * horas * dias * Kw
FORA PONTA	CONFORME ANEXO A	21	22	2200	= R\$ * horas * dias * Kw
FORA PONTA	CONFORME ANEXO A	24	4	2200	= R\$ * horas * dias * Kw
TOTAL					$\sum TOTAL\ MÊS$
FERIADOS QUE NÃO COMBRAM HORARIO DE PONTA NO ANO					TOTAL NO ANO
PONTA	CONFORME ANEXO A	3	8	2200	= R\$ * horas * dias * Kw
GERANDO UM TOTAL ANUAL DE:					
		$Total = \left(\sum TOTAL\ MÊS \times 12 \right) - TOTAL\ NO\ ANO$			

VALOR DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA ANUALMENTE - 5ª OPÇÃO					
HORÁRIO	VARIAÇÃO DO VALOR (R\$)	HORAS	DIAS	KW	TOTAL MÊS
PONTA	CONFORME ANEXO A	3	22	4730	= R\$ * horas * dias * Kw
FORA PONTA	CONFORME ANEXO A	21	22	4730	= R\$ * horas * dias * Kw
FORA PONTA	CONFORME ANEXO A	24	4	4730	= R\$ * horas * dias * Kw
TOTAL					$\sum TOTAL\ MÊS$
FERIADOS QUE NÃO COMBRAM HORARIO DE PONTA NO ANO					TOTAL NO ANO
PONTA	CONFORME ANEXO A	3	8	4730	= R\$ * horas * dias * Kw
GERANDO UM TOTAL ANUAL DE:					
		$Total = \left(\sum TOTAL\ MÊS \times 12 \right) - TOTAL\ NO\ ANO$			

APÊNDICE B

1ª OPÇÃO - Caldeira com produção de 30000Kg/h por 10kgf/cm²
Processo sem cogeração

Cálculos da proporção da água condensado

Dados	
m =	21150 Kg/h
h _s =	2780,72 Kj/Kg
h _e =	397,94 Kj/Kg
T _s =	181,54°C
T _e =	95°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,85

1º Lei da Termodinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 50395797 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_c = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_c = 6033,293 \text{ Kg/h}$$

Cálculo da proporção da água de alimentação

Dados	
m =	8850 Kg/h
h _s =	2780,72 Kj/Kg
h _e =	83,94 Kj/Kg
T _s =	181,54°C
T _e =	20°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,85

1º Lei da Termodinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 23866503 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_c = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_c = 2857,254 \text{ Kg/h}$$

Consumo Total de massa:

$$\dot{M}_c = 8890,55 \text{ Kg/h}$$

**2ª OPÇÃO - Caldeira com produção de 30000Kg/h por 30kgf/cm²
Processo com cogeração**

Cálculos da proporção da água condensado

Dados	
m =	21150 Kg/h
h _s =	3139,54 Kj/Kg
h _e =	397,94 Kj/Kg
T ₂ =	360°C
T ₁ =	95°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,85

1º Lei da Termodinâmica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 57984840 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_C = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_C = 6941,84 \text{ Kg/h}$$

Cálculo da proporção da água de alimentação

Dados	
m =	8850 Kg/h
h _s =	3139,54 Kj/Kg
h _e =	83,94 Kj/Kg
T _s =	360°C
T _e =	20°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,85

1º Lei da Termodinâmica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 27042060 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_C = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_C = 3237,426 \text{ Kg/h}$$

Consumo Total de massa:

$$\dot{M}_C = 10179,27 \text{ Kg/h}$$

**3ª OPÇÃO - Caldeira com produção de 35000Kgv/h por 42kgf/cm2
Processo com geração**

Cálculos da proporção da água condensado

Dados	
m =	24675 Kg/h
hs =	3258,25 Kj/Kg
he =	397,94 Kj/Kg
Ts =	420°C
Te =	95°C
Pci =	9827 Kj/Kg
n =	0,86

1° Lei da Termôdinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 70578149 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_C = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_C = 8351,238 \text{ Kg/h}$$

Cálculo da proporção da água de alimentação

Dados	
m =	10325 Kg/h
hs =	3258,25 Kj/Kg
he =	83,94 Kj/Kg
Ts =	420°C
Te =	20°C
Pci =	9827 Kj/Kg
n =	0,86

1° Lei da Termôdinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 32774751 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_C = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_C = 3878,109 \text{ Kg/h}$$

Consumo Total de massa:

$$\dot{M}_C = 12229,35 \text{ Kg/h}$$

**4ª OPÇÃO - Caldeira com produção de 30000Kg/h por 30kgf/cm²
Processo com geração**

Cálculos da proporção da água condensado

Dados	
m =	21150 Kg/h
h _s =	3139,54 Kj/Kg
h _e =	397,94 Kj/Kg
T _s =	360°C
T _e =	95°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,85

1º Lei da Termodinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 57984840 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_c = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_c = 6941,84 \text{ Kg/h}$$

Cálculo da proporção da água de alimentação

Dados	
m =	8850 Kg/h
h _s =	3139,54 Kj/Kg
h _e =	83,94 Kj/Kg
T _s =	360°C
T _e =	95°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,85

1º Lei da Termodinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 27042060 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_c = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_c = 3237,426 \text{ Kg/h}$$

Consumo Total de massa:

$$\dot{M}_c = 10179,27 \text{ Kg/h}$$

**5ª OPÇÃO - Caldeira com produção de 35000Kgv/h por 45kgf/cm²
Processo com geração**

Cálculos da proporção da água condensado

Dados	
m =	10325 Kg/h
h _s =	3324,42 Kj/Kg
h _e =	83,94 Kj/Kg
T _s =	450°C
T _e =	20°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,86

1° Lei da Termôdinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 72210894 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_C = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_C = 8544,434 \text{ Kg/h}$$

Cálculo da proporção da água de alimentação

Dados	
m =	10325 Kg/h
h _s =	3324,42 Kj/Kg
h _e =	83,94 Kj/Kg
T _s =	450°C
T _e =	20°C
P _{ci} =	9827 Kj/Kg
n =	0,86

1° Lei da Termôdinamica

$$Q = m(h_s - h_e)$$

$$Q = 33457956 \text{ Kj/h}$$

Equação do consumo de combustível

$$\dot{M}_C = \frac{\dot{m}v(h_{ae} - h_{vs})}{P_{ci} * n}$$

$$\dot{M}_C = 3958,95 \text{ Kg/h}$$

Consumo Total de massa:

$$\dot{M}_C = 3958,95 \text{ Kg/h}$$

APÊNDICE C

1ª opção - 10kgf/cm2		Preço da tonelada de vapor	
$Custo\ do\ Vapor = \frac{Custo_{comb.} * Entalpia_{vapor}}{PCI_{comb.} * \eta_{caldeira}}$ $Custo_{Comb.} = \text{Custo do combustível (R\$/t)}$ $Entalpia_{vapor.} = \text{Entalpia do vapor (Kj/kg)}$ $PCI_{comb.} = \text{Poder Calorífico inferior do combustível(Kj/kg)}$ $\eta_{caldeira} = \text{Rendimento da caldeira (\%)}$			
Água de Alimentação - 20°C			
Dados			
$Custo_{Comb.}$	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
$Entalpia_{vapor.}$	397,94 Kj/Kg		
$PCI_{comb.}$	9827 Kj/Kg	$Custo_{Comb.} = 7,1461 \text{ (R$/t)}$	
$\eta_{caldeira}$	0,85		
Água do Condensado- 95°C			
Dados			
$Custo_{Comb.}$	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
$Entalpia_{vapor.}$	2780,72 Kj/Kg		
$PCI_{comb.}$	9827 Kj/Kg	$Custo_{Comb.} = 49,935 \text{ (R$/t)}$	
$\eta_{caldeira}$	0,85		
Total de Custo do vapor			57,082 R\$/t

2ª e 4ª opção - 10kgf/cm2		Preço da tonelada de vapor	
$Custo\ do\ Vapor = \frac{Custo_{comb.} * Entalpia_{vapor}}{PCI_{comb.} * \eta_{caldeira}}$ <i>Custo_{Comb.}</i> = Custo do combustível (R\$/t) <i>Entalpia_{vapor.}</i> = Entalpia do vapor (Kj/kg) <i>PCI_{comb.}</i> = Poder Calorífico inferior do combustível(Kj/kg) <i>η_{caldeira}</i> = Rendimento da caldeira (%)			
Água de Alimentação - 20°C			
Dados			
<i>Custo_{Comb.}</i>	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
<i>Entalpia_{vapor.}</i>	397,94 Kj/Kg		
<i>PCI_{comb.}</i>	9827 Kj/Kg	<i>Custo_{Comb.}</i> = 7,1461 (R\$/t)	
<i>η_{caldeira}</i>	0,85		
Água do Condensado- 95°C			
Dados			
<i>Custo_{Comb.}</i>	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
<i>Entalpia_{vapor.}</i>	3139,54 Kj/Kg		
<i>PCI_{comb.}</i>	9827 Kj/Kg	<i>Custo_{Comb.}</i> = 56,379 (R\$/t)	
<i>η_{caldeira}</i>	0,85		
Total de Custo do vapor			63,525R\$/t

3ª opção - 42kgf/cm2		Preço da tonelada de vapor	
$Custo\ do\ Vapor = \frac{Custo_{comb.} * Entalpia_{vapor}}{PCI_{comb.} * n_{caldeira}}$ $Custo_{Comb.} = Custo\ do\ combustível\ (R\\$/t)$ $Entalpia_{vapor.} = Entalpia\ do\ vapor\ (Kj/kg)$ $PCI_{comb.} = Poder\ Calorífico\ inferior\ do\ combustível(Kj/kg)$ $\eta_{Caldeira} = Rendimento\ da\ caldeira\ (\%)$			
Água de Alimentação - 20°C			
Dados			
$Custo_{Comb.}$	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
$Entalpia_{vapor.}$	397,94 Kj/Kg		
$PCI_{comb.}$	9827 Kj/Kg	$Custo_{Comb.} = 7,1461\ (R\\$/t)$	
$\eta_{Caldeira}$	0,85		
Água do Condensado- 95°C			
Dados			
$Custo_{Comb.}$	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
$Entalpia_{vapor.}$	3258,25 Kj/Kg		
$PCI_{comb.}$	9827 Kj/Kg	$Custo_{Comb.} = 58,511\ (R\\$/t)$	
$\eta_{Caldeira}$	0,85		
Total de Custo do vapor			65,657 R\$/t

5ª opção - 45kgf/cm2		Preço da tonelada de vapor	
$Custo\ do\ Vapor = \frac{Custo_{comb.} * Entalpia_{vapor}}{PCI_{comb.} * n_{caldeira}}$ $Custo_{Comb.} = \text{Custo do combustível (R\\$/t)}$ $Entalpia_{vapor.} = \text{Entalpia do vapor (Kj/kg)}$ $PCI_{comb.} = \text{Poder Calorífico inferior do combustível(Kj/kg)}$ $\eta_{Caldeira} = \text{Rendimento da caldeira (\%)}$			
Água de Alimentação - 20°C			
Dados			
$Custo_{Comb.}$	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
$Entalpia_{vapor.}$	397,94 Kj/Kg		
$PCI_{comb.}$	9827 Kj/Kg	$Custo_{Comb.} = 7,1461 (R\$/t)$	
$\eta_{Caldeira}$	0,85		
Água do Condensado- 95°C			
Dados			
$Custo_{Comb.}$	0,15 R\$/Kg	Custo do Combustível	
$Entalpia_{vapor.}$	3324,42 Kj/Kg		
$PCI_{comb.}$	9827 Kj/Kg	$Custo_{Comb.} = 59,69 (R\$/t)$	
$\eta_{Caldeira}$	0,85		
Total de Custo do vapor			66,84R\$/t