

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - ELETROTÉCNICA

EDUARDO ALFREDO PIRES
HAMILTON MULLER JUNIOR
RUNAN AGUIRRE SUARES

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA PARA INSTALAÇÃO
DE UM TERMOGERADOR EM QUEIMADOR DE GASES DE ESTUFAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

EDUARDO ALFREDO PIRES
HAMILTON MULLER JUNIOR
RUNAN AGUIRRE SUARES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA PARA INSTALAÇÃO
DE UM TERMOGERADOR EM QUEIMADOR DE GASES DE ESTUFAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador:

Prof. Msc Clider Adriane de Souza Silva

CURITIBA

2013

**Eduardo Alfredo Pires
Hamilton Muller Junior
Runan Aguirre Soares**

Estudo de viabilidade técnica/econômica para instalação de um termogerador em queimador de gases de estufas

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 11 de setembro de 2013.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Clider Adriane de Souza Silva, Msc..
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Clider Adriane de Souza Silva, Msc..
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Antonio Ivan Bastos Sobrinho, Prof.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gilberto Manoel Alves, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto da dedicação individual de cada integrante da equipe e de todos os professores da UTFPR que nestes anos de estudo estiveram sempre dispostos a ensinar e transferir seus conhecimentos, e também de nossos colegas que colaboraram de uma forma direta ou indireta para que ampliássemos nossos conhecimentos.

Agradecemos nossos pais, irmãos, filhas, esposas e namoradas pela paciência e apoio nos momentos mais difíceis em que muitas vezes tivemos nos ausentar para que tudo isso se tornasse possível.

“Jamais permitirei que o meu dia termine com um fracasso”.
(Og Mandino)

RESUMO

MULLER JR, Hamilton. PIRES, Eduardo Alfredo. SUARES, Runan Aguirre. Estudo de Viabilidade Técnica/Econômica para Instalação de um Termogerador em Queimador de Gases de Estufa. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Motivados por uma sociedade que atualmente vive com questões ambientais mais rigorosas, explora cada vez mais e dá valor aos recursos renováveis, e reutiliza matérias primas ou secundárias para obter novos produtos e formas de energias utilizáveis, ato que recebe o nome de cogeração, elaboramos este Trabalho de Conclusão de Curso com o intuito de fornecer uma alternativa de reaproveitamento de energia a uma indústria automotiva. Com o objetivo principal de aproveitar uma energia térmica já disponível no setor de pintura de uma automotiva localizada em São José dos Pinhais, realizamos este trabalho com o intuito de verificar se é ou não possível utilizar o vapor produzido pela incineração dos gases tóxicos provenientes da queima do solvente utilizado nas tintas aplicadas na superfície do veículo para, por meio de uma pequena central termelétrica (PCT), gerar energia elétrica. O processo se dá através da queima do gás natural (combustível principal) e do vapor produzido e expelido a atmosfera, sendo o objetivo principal o aproveitamento do mesmo. Na atualidade, tudo que envolve o reaproveitamento e, conseqüentemente, a cogeração é bem visto pela sociedade, não por envolver apenas questões ambientais, mas também por trazer benefícios econômicos. Aqui serão apresentadas as medições colhidas em campo, assim como os cálculos necessários para comprovar a viabilidade da instalação de um turbogerador e, se assim for provado, serão apresentados os equipamentos corretamente dimensionados para atender a necessidade de geração térmica e também os cálculos de investimento e *payback* do estudo de viabilidade de implantação do termogerador.

Palavras chave: Geração. Cogeração. Energia elétrica. Queimador. Vapor. Termogeração. Viabilidade técnica. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

MULLER JR, Hamilton. PIRES, Eduardo Alfredo. SUARES, Runan Aguirre. Study of Technical/Economic Viability for the Installation of a Thermal Generator in a Burner of Heater Gases. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Motivated by a society that currently lives with more stringent environmental issues, every time explores more and cares about renewable resources, and reuse raw materials to get new products and forms of usable energies, act that is called cogeneration, we made this work with the intention of providing an alternative to reuse energy for an automotive industry. With the main purpose of enjoy the thermal energy already available at the paintshop of an automotive industry located at São José dos Pinhais, we made this study in order to verify whether it is possible to use the steam produced by the burning of toxic gases from the burning of the solvent used in paints applied on cars, through a small thermoelectric power plant (STPP), to generate electric power. The process occurs through the burning of natural gas (primary fuel) and the steam produced and expelled into the atmosphere, which is the main purpose, take advantage of it. Nowadays, everything that involves reuse and cogeneration is well regarded by society, not only because involves environmental issues, but also brings economic benefits. Here will be present the measurements collected in the field, as well as the calculations required to establish is whether or not viable to install the turbogenerator and if so proven, will be presented the equipments properly sized to cater the necessity for thermal generation and also the investment calculations and payback of the feasibility study of implementing the thermogenerator.

Keywords: Generation. Cogeneration. Electric power. Burner. Steam. Thermoelectric. Technical viability. Economic viability.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: cogeração de energia	6
Figura 2: cogeração com ciclo de Rankine	7
Figura 3: ciclo de Rankine ideal	8
Figura 4: turbina a gás.....	9
Figura 5: cogeração em turbinas a vapor	11
Figura 6: esquemático de geração e distribuição de energia elétrica.....	25
Figura 7: esquema de armadura giratória.....	26
Figura 8: gerador com armadura fixa.....	27
Figura 9: turbina de Laval.....	28
Figura 10: turbina de Laval (corte)	29
Figura 11: turbina Curtis	30
Figura 12: turbina Rateau.....	32
Figura 13: fluxo do vapor	35
Figura 14: fluxo de água na caldeira aqua-tubular.....	36
Figura 15: partes componentes	38
Figura 16: ciclo de Carnot.....	39
Figura 17: ciclo de Rankine sem superaquecimento de vapor.....	39
Figura 18: (A e C) – turbina e princípio de ação; (B e D) – turbina e princípio de reação	40
Figura 19: turbogerador WEG	43
Figura 20: turbogerador aberto autoventilado.....	45
Figura 21: turbogerador aberto autoventilado.....	46
Figura 22: funcionamento da torre de resfriamento.....	47

Figura 23: instalação de cogeração do tipo “ <i>topping cycle</i> ”	53
Figura 24: instalação de cogeração do tipo “ <i>bottoming cycle</i> ”	54
Figura 25: situação da cogeração no Brasil em relação à atividade associada ao processo	56
Figura 26: situação da cogeração no Brasil – distribuição da potência instalada por estado	57
Figura 27: “layout” do setor elétrico brasileiro.....	59
Figura 28: princípio de termogeração	71
Figura 29: chaminés de entrada e saída do queimador	75
Figura 30: queimador.....	76
Figura 31: tela do Supervisório.....	77
Figura 32: medidor multifunção TESTO 400.....	80
Figura 33: transdutor.....	81
Figura 34: tubo de Pitot.....	81
Figura 35: medição de vazão e pressão do vapor	82
Figura 36: termômetro	83
Figura 37: medição de temperatura do vapor	83
Figura 38: turbina TG320	86
Figura 39: caldeira Alfa Laval Aalborg.....	89
Figura 40: gerador WEG GTA311	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: medições de saída da chaminé	84
Tabela 2: custo da instalação	91

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AP – Autoprodutor

atm – atmosfera

CHP – “*Combined Heat and Power*”

CNTP – Condições normais de temperatura e pressão

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COV’s – Compostos Orgânicos Voláteis

ddp – Diferença de Potencial

DSR – Demanda Suplementar de Reserva

Ec – Energia Cinética

Em – Energia Mecânica

Epe – Energia Potencial elástica

Epg – Energia Potencial Gravitacional

Hz – Hertz

IAP – Instituto Ambiental do Paraná

IP – Índice de Profiabilidade

J – Joule

kVA – quilovolt-Ampere

kW – quilowatt

kWh – quilowatt-hora

MAE – Mercado Atacadista de Energia

mca – metros coluna água

MCT – Micro Central Térmica

mmca – milímetros coluna água

MME – Ministério de Minas e Energia

MWh – Megawatt-hora

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

ONS – Operador Nacional do Sistema

PCT – Pequena Central Térmica

PIE – Produtor Independente de Energia

PMG – *“Permanent Magnet Generator”*

Psig – *Pounds per Square Inch Gauge*

ROI – *“Return On Investment”*

RPM – Rotações por minuto

SEMA – Secretaria do Meio Ambiente

SI – Sistema Internacional

TIR – Taxa Interna de Retorno

UTE – Usina Termelétrica

VPL – Valor Presente Líquido

WACC – *“Weighted Average Cost of Capital”*

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Tema	2
1.1.1	Termogeração	2
1.1.1.1	As usinas termelétricas.....	3
1.1.1.2	Impactos ambientais.....	5
1.1.2	Cogeração	5
1.1.2.1	Vantagens	6
1.1.2.2	Tecnologia.....	7
1.1.2.3	Turbina e motor a gás.....	9
1.1.2.4	Turbinas a Vapor.....	10
1.1.2.5	Combustíveis.....	11
1.1.2.6	Exemplos de aplicação.....	12
1.1.2.7	A Cogeração e o meio ambiente	12
1.1.3	Delimitação do tema	13
1.2	Problemas e premissas	14
1.3	Objetivos.....	14
1.3.1	Objetivo geral.....	14
1.3.2	Objetivos específicos	15
1.4	Justificativa	15
1.5	Procedimentos Metodológicos.....	16
1.6	Estrutura do trabalho.....	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	19

2.1	Energia.....	19
2.2	Tipos de energia.....	20
2.2.1	Energia cinética	20
2.2.2	Energia potencial	21
2.2.3	Energia térmica.....	22
2.2.4	Energia elétrica	23
2.3	Geração de energia	24
2.3.1	Princípio de funcionamento.....	26
2.4	Turbinas a vapor	27
2.4.1	Turbina de Laval.....	28
2.4.2	Turbina Parsons	29
2.4.3	Turbina Curtis	30
2.4.4	Turbina Rateau	31
2.5	Equipamentos envolvidos na instalação	33
2.5.1	Caldeira.....	33
2.5.2	Turbina a vapor.....	37
2.5.3	Gerador	42
2.5.4	Turbogeradores	42
2.5.5	Características construtivas	44
2.5.6	Refrigeração.....	45
2.5.7	Torres de resfriamento.....	46
2.5.8	Condensador	48
2.5.9	Redutor de velocidade	48
2.5.10	Bomba de alimentação da caldeira	49
2.6	Cogeração	49

2.6.1	Introdução à cogeração.....	49
2.6.2	Questão ambientalista.....	50
2.6.3	A contribuição da cogeração no controle do efeito estufa.....	51
2.6.4	A cogeração para o uso mais eficiente da energia.....	52
2.6.5	A cogeração e o sistema elétrico de distribuição.....	54
2.6.6	A cogeração nas indústrias	55
2.6.7	A cogeração em outros setores de economia.....	55
2.6.8	Situação da cogeração no Brasil.....	56
2.6.9	Legislação da cogeração no Brasil	57
2.6.10	Layout do setor elétrico brasileiro.....	58
2.6.11	Alternativas tecnológicas para cogeração.....	59
2.6.12	Viabilidade de um “sistema de cogeração”	61
2.7	Variáveis financeiras de projetos.....	61
2.7.1	Valor presente líquido (VPL)	61
2.7.2	Taxa interna de retorno (TIR).....	62
2.7.3	Média ponderada de custo de capital.....	62
2.7.4	Retorno sobre investimento.....	64
2.7.5	Tempo de retorno de capital	64
2.7.6	Variáveis particulares de decisão	65
2.7.7	Critérios para aprovação de investimentos.....	66
3.	ESTUDO DE IMPLANTAÇÃO.....	67
3.1	Introdução ao estudo.....	67
3.2	Tecnologia de geração	70
3.3	Aspectos para dimensionamento	72
3.4	Queimador	73

3.5	Início do dimensionamento	78
3.5.1	Vapor de saída do incinerador	78
4.	DIMENSIONAMENTO.....	85
4.1	Turbina.....	85
4.2	Problemas encontrados ao longo do estudo.....	86
4.3	Caldeira.....	87
4.4	Gerador	89
4.5	Aprovação de investimentos.....	91
5.	CONCLUSÕES FINAIS	93
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem se destacado no cenário internacional, como um dos países emergentes no mundo; este título é decorrente de um crescimento industrial de 5% a.a na última década. Ao atingir o status “pleno emprego” em 2011, com índice de 6% de desemprego, verifica-se como a indústria nacional tem crescido neste período.

O aumento do consumo de bens duráveis, é um dos efeitos colaterais mais sentidos na sociedade; nunca a indústria brasileira produziu neste ritmo, e mesmo assim, existem milhares de consumidores ávidos por consumir.

A energia elétrica passou a ser um dos mais importantes recursos para garantir este ritmo de crescimento, e também, por consequência, um dos maiores desafios dos técnicos e engenheiros da área. Criar meios de conservação e uso racional, tornou-se vital para qualquer possibilidade de competição comercial.

O segmento que está em franca expansão é, sem dúvida alguma, o automobilístico; mesmo com a presença de marcas além fronteiras, a indústria nacional cresceu 5% em 2011.

Quando falamos em indústria automobilística, remetemos automaticamente em pensar em eficiência industrial, tecnologia de ponta, e controle de custos, não que os outros seguimentos industriais não deem importância a este quesito; porém, a complexidade deste mercado acirra a competitividade e a necessidade de buscar alternativas para minimizar as despesas de fabricação.

1.1 Tema

1.1.1 Termogeração

A geração termelétrica consiste basicamente na geração de energia elétrica a partir da energia liberada em forma de calor, normalmente por meio da combustão de algum tipo de combustível renovável ou não renovável. Essa energia térmica pode ser obtida através de vários combustíveis, como óleo combustível, gás natural, carvão, entre outros. Esses combustíveis são queimados na câmara de combustão. O vapor movimenta as pás de uma turbina, a qual está conectada a um gerador, que finalmente tem a função de gerar a força eletromotriz.

Muitos consumidores, atualmente, estão buscando por uma autossuficiência em geração de energia, e, por isso, a geração termelétrica tem muito “peso” nessa ideia. E quando se fala em cogeração, podemos relacionar o assunto, principalmente, com a geração termelétrica.

No Brasil, o investimento à procura de fontes alternativas de energia, e a tão comentada eficiência energética, tem sido muito grande; um exemplo disso é visto na Usina Termelétrica (UTE) de Juiz de Fora, em MG, que, após muitos investimentos, agora é a primeira UTE do mundo a gerar energia com o etanol, isto é, ela passa a ser *flex-fuel* (bicomcombustível): opera com gás natural e com etanol. Outro exemplo é observado na UTE Euzébio Rocha, em Cubatão-SP, a qual tem capacidade instalada de 208 MW, e opera em sistema de cogeração, produzindo energia elétrica e vapor a partir do gás natural.

Assim, é possível encontrar vários tipos de combustíveis para a geração termelétrica. A geração a carvão é de uso convencional, mas seu grande empecilho é a poluição ambiental que ela causa. Esse é um dos tipos de combustíveis que mais agridem o meio ambiente. Já a UTE operada através de gás natural, é uma medida ainda pouco usada, devido ao fato de que essas usinas ainda dependem do capital privado, o qual se mantém numa posição de reserva, sem arriscar muito, à espera de definições, por parte do Governo Federal, em relação ao preço do gás. O gás natural ainda é visto como uma alternativa mais eficiente para a geração termelétrica, além de causar menor impacto ambiental diante das térmicas convencionais a óleo combustível e a carvão.

Existem também as UTE's nucleares, quando o combustível é um material radioativo que, em sua cisão, gera a energia necessária para seu funcionamento. Nessa usina existe o reator, onde o calor é gerado pela cisão de núcleos atômicos, sendo utilizado para a produção de vapor. O vapor aciona um conjunto turbina mecânica-gerador elétrico. Desse modo, este sistema é equivalente às caldeiras de carvão, a gás natural, ou a óleo combustível das UTE's convencionais. O impacto ambiental desse tipo de UTE, é muito mais baixo do que os outros tipos de UTE's movidos por outros combustíveis, tendo um índice de 1% da exposição devido à radiação natural. Em se tratando de economia, as Usinas Nucleares também tem grande influência, pois o combustível nuclear contém maior conteúdo energético em determinada quantidade, do que a mesma quantidade em massa de carvão ou óleo combustível.

A geração termelétrica a óleo combustível, por sua flexibilidade de operação e planejamento, em 1980, foi muito importante em diversos países, como Holanda, Reino Unido, Irlanda, etc. Atualmente, essa flexibilidade ainda é muito favorável para sua utilização; além disso, esse tipo de geração supre o atendimento da demanda de ponta e o atendimento a sistemas remotos ou isolados. Não é um sistema barato devido ao preço de seu combustível; porém, é muito utilizado quanto à disposição de carga básica ou intermediária, quando não existe alternativas mais econômicas.

Ainda está em grande crescimento a geração termelétrica no Brasil, conforme índice dos últimos anos, com relação a todos os sistemas de geração que o Brasil possui: 14,68% são usinas termelétricas em operação, mais de 11.000 MW de potência.

1.1.1.1 As usinas termelétricas

O funcionamento das centrais termelétricas é semelhante uma das outras, independentemente do combustível com o qual elas operam. O combustível é armazenado em parques ou depósitos adjacentes, o qual é enviado para a usina para ser queimado na caldeira. A caldeira gera vapor a partir da água que circula por uma extensa rede de tubos que revestem suas

paredes. A função desse vapor é movimentar as pás de uma turbina, cujo rotor gira em sincronia com o eixo do gerador.

Essa energia é transportada para os centros de consumo. O vapor é resfriado por um condensador, e é convertido em água novamente, a qual volta para os tubos da caldeira para se iniciar um novo ciclo.

Nesse processo existem alguns efeitos contaminantes derivados da combustão, por isso, as centrais dispõem de chaminés, com altura de até trezentos metros. Existem também alguns precipitadores que retêm as cinzas e outros resíduos voláteis da combustão. Essas cinzas são aproveitadas em processos de metalurgia e no ramo da construção, onde são misturadas com o cimento.

Devido às altas correntes geradas, produz-se um calor intenso. Por isso é muito importante o resfriamento dos geradores, que é feito por meio do hidrogênio líquido, melhor veículo de resfriamento que o ar, pois se necessita menos energia para sua circulação. Além disso, existe o resfriamento líquido feito através de óleo ou água, os quais têm um melhor processo do que os gases ou do que o ar.

Uma das principais vantagens das Usinas Termelétricas é a condição de serem construídas onde são mais necessárias, economizando no custo das linhas de transmissão. Esse tipo de usina pode ser muito encontrado na Europa e em algumas regiões do Brasil. Outra vantagem visivelmente comprovada é a utilização do gás natural como combustível, que pode ser utilizado como matéria-prima para gerar calor, eletricidade, e força motriz em indústrias químicas, siderúrgica, petroquímica e de fertilizantes, com a vantagem de ser menos poluente do que o carvão e os combustíveis derivados do petróleo.

Mas a grande desvantagem dessas usinas é o alto preço dos combustíveis utilizados nelas, e dependendo do combustível, pode ter um impacto ambiental muito forte, causando muita poluição no ar, aquecimento nas águas, entre outros fatores.

Ademais, o aproveitamento da fonte energética, os combustíveis, utilizados nas usinas, não é 100% eficiente. Apenas cerca de 38% da energia térmica inserida na usina pelo combustível, torna-se aproveitável como energia elétrica.

1.1.1.2 Impactos ambientais

Assim como os vários tipos de geração de energia, a geração termelétrica também causa impactos ambientais, e contribuem para o aquecimento global. A queima de gás natural que feita por essas UTE's, lança grandes quantidades de poluentes na atmosfera, além de se tratar de um combustível fóssil que não se recupera.

O Brasil lança quatro e meio milhões de toneladas de carbono por ano na atmosfera. Com o crescimento dessa geração termelétrica, esse indicador chegará a dezesseis milhões.

O principal custo das termelétricas é na compra de combustíveis, que têm um valor significativamente alto.

1.1.2 Cogeração

Apesar dos enormes investimentos do setor elétrico na infraestrutura de suprimento, sempre se verificou a busca pela auto suficiência por alguns consumidores de eletricidade. Há indústrias que possuem subprodutos combustíveis de baixo valor, ou poluentes, e que aproveitam tudo o que podem ao extrair-lhes a energia.

A cogeração é uma solução de engenharia, aplicável para determinados usuários de energia, que pode viabilizar economicamente a autoprodução de energia. Em princípio, a cogeração é aplicável a qualquer instalação na qual se necessita das duas formas de energia: energia elétrica e energia térmica.

Originalmente definida como *Combined Heat and Power* (CHP), a cogeração é a geração simultânea e combinada de energia térmica e energia elétrica ou mecânica, utilizando uma mesma fonte, reduzindo os custos de produção e aproveitando ao máximo o conteúdo energético de uma fonte.

De forma simplificada pode-se verificar o funcionamento na figura 1:



Figura 1: cogeração de energia

Fonte: BRASIL, Newton Paterman. Notas de aula.

1.1.2.1 Vantagens

A cogeração apresenta diversos aspectos que atraem as empresas para esta alternativa. A primeira que vem à tona, é quanto à redução de custos operacionais. Em muitas empresas, a participação do custo de energia no custo final do produto pode ser muito grande, e a possibilidade de aumentar a eficiência no aproveitamento da energia adquirida é sempre atraente. Para isso, é necessário que as tarifas pagas pela empresa sejam favoráveis, sendo que quanto mais a empresa pagar pela energia elétrica, mais viável se torna a cogeração.

Outro ponto envolve a questão ambiental. Algumas empresas, mesmo não obtendo resultados representativos na redução dos seus custos, recorrem à cogeração buscando beneficiar sua imagem junto ao mercado, mostrando-se como uma empresa moderna tecnologicamente, e preocupada com conservação de energia e com o meio ambiente.

1.1.2.2 Tecnologia

As plantas de cogeração mais comuns são baseadas no Ciclo de Rankine, e utilizam uma caldeira, turbina a vapor, e gerador. A caldeira é responsável por gerar vapor em alta pressão, que será enviado à uma turbina de contrapressão ou com extração, acionando o gerador elétrico, e, ainda assim devolvendo uma parcela de vapor destinada a atender a demanda térmica do consumidor, conforme figura 2:

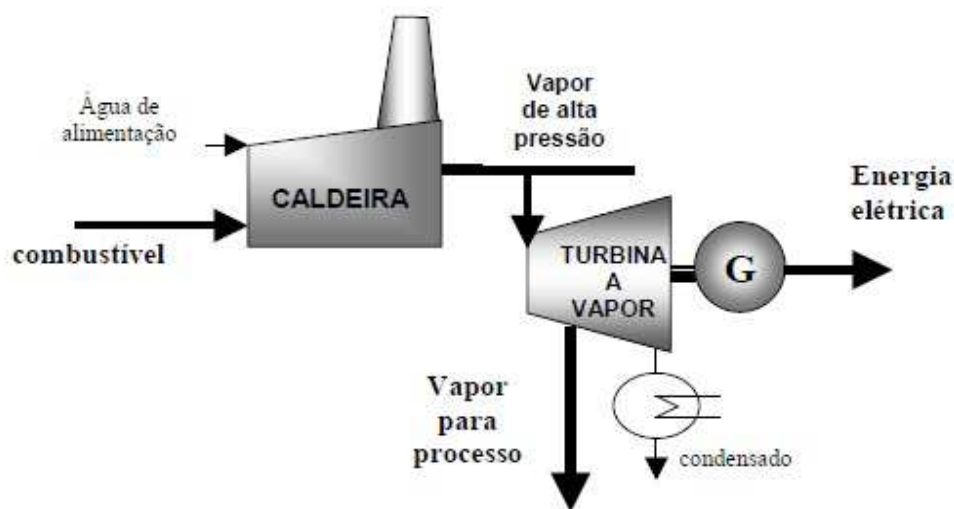


Figura 2: cogeração com ciclo de Rankine
Fonte: BRASIL, Newton Paterman. Notas de aula.

Entende-se por Ciclo de Rankine, um ciclo termodinâmico onde sua eficiência máxima é obtida através de um Ciclo de Carnot, tendo o fluido de trabalho seguindo um ciclo fechado e constantemente reutilizado, denominado também como ciclo perfeito ou ideal. A figura 3 representa o Ciclo de Rankine.

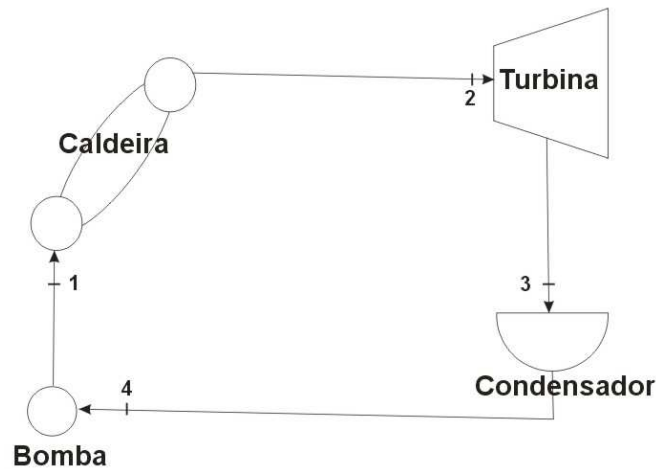


Figura 3: ciclo de Rankine ideal
Fonte: BRASIL, Newton Paterman. Notas de aula.

O Ciclo de Rankine descreve a operação de turbinas a vapor, comumente encontradas em estações de energia, onde o trabalho é gerado ao se vaporizar e condensar-se alternadamente com um fluido de trabalho.

Na prática, somente é possível o Ciclo de Rankine real (não ideal), sendo o processo não reversível, onde a entropia aumenta durante os processos, fazendo com que a energia requerida pela bomba seja cada vez maior, e que o trabalho produzido pela turbina seja menor do que o produzido num estado ideal.

Para a cogeração são utilizadas as tais tecnologias:

- turbina e motor a gás;
- compressor de gás;
- caldeira de recuperação;
- gerador de água gelada;
- painel de sincronismo e paralelismo;
- turbinas a vapor.

Pelo motivo de aplicação no estudo de caso, o este trabalho abordará apenas as duas maneiras que se encaixam no problema a ser resolvido, sendo elas a utilização da turbina ou motor a gás, e também a turbina a vapor.

1.1.2.3 Turbina e motor a gás

Sendo o principal equipamento de um sistema de cogeração, tanto a turbina quanto o motor, têm a função de converter a energia proveniente da combustão, em energia mecânica, que será responsável por acionar um gerador elétrico. Além da energia elétrica, também é produzido uma grande quantidade de energia térmica, que se apresenta totalmente na forma de gases de combustão de descarga, gases esses constituídos principalmente de ar e CO₂.

De toda a energia fornecida pelo combustível, a turbina gera de 22% a 35% de energia elétrica. As diferenças estão nas potências disponíveis no mercado. Motores a gás acima de 5 kW não são encontrados, e as turbinas existem desde pequenas potências até 300 MW. A seguir a figura 4 exemplifica uma turbina a gás.

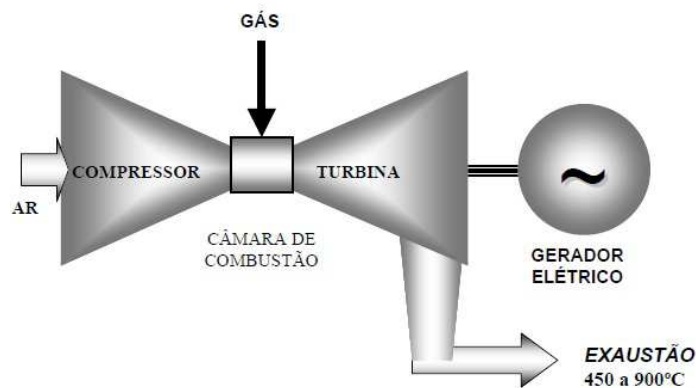


Figura 4: turbina a gás

Fonte: BRASIL, Newton Paterman. Notas de aula.

Do conceito técnico de cogeração, devemos destacar alguns aspectos, que nos ajudam a ter uma ideia de em quais instalações de utilização a alternativa pode vir a se viabilizar economicamente.

O equipamento acionador do gerador mantém uma relação quase constante entre energia mecânica produzida no eixo, e energia térmica disponibilizada nos gases da descarga. Com base em dados de fabricantes, essa relação é de cerca de 1:2, no caso de turbina a gás, e cerca de 1,6:1 no caso de motor a gás. Isso significa que uma planta com demanda térmica com valor que seja o dobro da demanda elétrica (na mesma unidade de engenharia), tende a ter vocação para

cogeração com turbina. Se a demanda elétrica for apenas um pouco maior do que a térmica, e dependendo do seu valor, é possível que motores a gás atendam, e a cogeração se viabilize. Além disso, as duas precisam apresentar alguma coincidência no tempo, para não haver excedente não aproveitado.

1.1.2.4 Turbinas a Vapor

Sua aplicação maior é em sistemas de cogeração *bottoming* ou em ciclo combinado. O princípio de funcionamento é similar ao da turbina a gás, só que o vapor, superaquecido, já entra na turbina com a energia que precisa para acionar os rotores. O vapor pode ser retirado ainda com pressão e temperatura para ser utilizado no processo, ou no estado chamado "exausto", em que está saturado e pronto para entregar seu calor latente, e se tornar líquido no condensador.

Uma importante vantagem da turbina a vapor, quando comparada com a turbina a gás, é a sua baixa necessidade de manutenção, pois recebe um fluido em temperatura não muito alta e limpo, e, se este for sempre seco, e a turbina tiver manutenções preventivas frequentes, sua vida útil pode ser de várias décadas. A figura 5 representa um modelo de cogeração em turbinas a vapor.

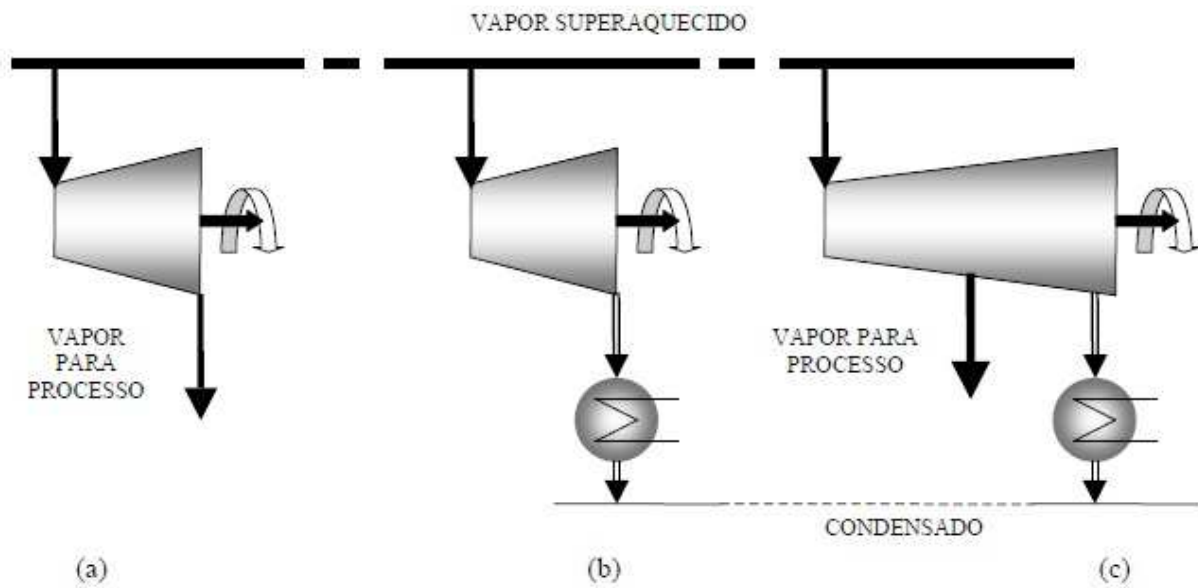


Figura 5: cogeração em turbinas a vapor
Fonte: BRASIL, Newton Paterman. Notas de aula.

1.1.2.5 Combustíveis

A cogeração se apresenta como forma de aproveitamento máximo do conteúdo energético, podendo ser combustíveis fósseis ou de biomassa.

Atualmente, o combustível que reúne as melhores condições comerciais e de qualidade tanto energética quanto ambiental, é o gás natural, sendo o mais eficiente e o que tem as menores emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre, e óxidos de nitrogênio.

1.1.2.6 Exemplos de aplicação

A cogeração já é utilizada nos setores industrial e terciário. Neste último ela é usada em shoppings, hospitais, hotéis, centros comerciais, aeroportos, e demais locais que demandam muito ar condicionado e água quente, além da energia elétrica.

Sendo nosso objetivo principal o setor industrial, ela é aplicada em casos onde a indústria se caracteriza por processos em que há uma grande demanda de energia térmica na forma de vapor, tanto para o acionamento de turbinas, como para aquecimento, ou ainda para a utilização direta no processo. Alguns exemplos são:

- indústria de petróleo;
- indústria química;
- indústria têxtil;
- indústria de celulose;
- indústria de alimentos e bebidas;
- indústria de cerâmica branca.

Nosso objetivo é realizar um estudo técnico e econômico da viabilidade de implantação da cogeração, em uma indústria automotiva no setor da pintura, que também demanda grandes quantidades de água quente, energia térmica e eletricidade, para realizar os processos da área.

1.1.2.7 A Cogeração e o meio ambiente

A cogeração tem sido considerada uma solução energética benéfica para o meio ambiente, na medida em que menos combustíveis fósseis são queimados para gerar energia, substituindo-os pelo uso de gás natural, que é o combustível que menos emite gases tóxicos como citado anteriormente.

Nos casos de setores agropecuários, existe a queima das sobras da matéria, como o bagaço da cana-de-açúcar, palha e o bagaço do milho, gerando um combustível renovável, cujo dióxido de carbono lançado pela queima é recapturado pelo replantio, amenizando assim o efeito estufa.

1.1.3 Delimitação do tema

A proposta deste estudo, é a utilização da energia potencial envolvida na emissão destes gases no incinerador, para convertê-la em energia elétrica, que será utilizada na iluminação comum do prédio de pintura, sendo esta a parcela que ilumina corredores e áreas auxiliares, mantendo a iluminação de processos produtivos na fonte convencional: a concessionária de energia.

A análise econômica buscará avaliar se o setor apresenta condições técnicas e econômicas para adotar a cogeração como parte de seu sistema de produção de utilidades. Em outras palavras, a análise verificará se a redução que se pode obter nos custos de aquisição da energia, é suficiente para garantir um retorno adequado para o investimento a ser realizado. Outra forma de ver a vantagem está em conseguir um custo de autoprodução de energia elétrica menor do que o obtido através da compra da concessionária.

Porém, a instalação efetiva do gerador, está submetida à constatação técnico/econômica da viabilidade de um projeto desta montadora, e este trabalho visa realizar de forma organizada e metódica, um levantamento que subsidie a diretoria da empresa a decidir pela instalação ou não deste gerador.

1.2 Problemas e premissas

Uma fábrica de automóveis é subdividida em quatro grandes setores: estamparia, carroceria, pintura e montagem final, além é claro dos setores de apoio, como administrativo, logística e manutenção.

Em termos de consumo de energia, o setor de pintura merece um destaque especial, uma vez que é responsável por 36% do consumo total da empresa. Os processos de tratamento de superfície, cataforese e pintura baseiam-se, em eletricidade além, é claro, da necessidade de iluminação.

Dentro de todo o processo de pintura, a temperatura é um elemento de controle de processo: a cura das camadas de tinta define a qualidade do produto final. Esta etapa requer a utilização de estufas de secagem, que consomem gás natural para as chamas, e eletricidade para os transportadores e motores dos ventiladores de circulação de ar quente.

Os gases emanados destas estufas devem ser incinerados antes de serem enviados ao meio ambiente, para evitar a contaminação com gases expelidos, emitindo para a atmosfera somente ar limpo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Proporcionar uma alternativa de aproveitamento da energia cinética disponível no queimador, transformando-a em energia elétrica disponível ao departamento de pintura de uma indústria automotiva.

1.3.2 Objetivos específicos

- Instalação de termogerador no circuito de escape de gases do incinerador;
- aproveitamento da energia elétrica para o circuito de iluminação do departamento de pintura;
- padronizar o projeto com as normas mundiais da automotiva, para permitir que esta instalação seja feita em qualquer planta no mundo que tenha a mesma topologia;
- estabelecer parâmetros que garantam comparar a viabilidade econômica da instalação, dentro dos padrões de investimento da automotiva em questão.

1.4 Justificativa

Dentre os itens que mais pesam nos custos operacionais, está, sem dúvida nenhuma, o da energia elétrica, tão essencial para manutenção da produção; as concessionárias de energia elétrica incentivam a criação de projetos de conservação, através de programas governamentais, tais como PROINFA (Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica) e PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica).

Além do fator econômico, existe a necessidade humana de preservação do meio ambiente, e temos que lembrar que, cada passo que dermos para economizar este insumo, estar-se-á contribuindo também para isto, com a redução da emissão de gases e diminuição do efeito estufa, mostrando comprometimento com a sustentabilidade do planeta.

Na empresa de automóveis, objetivo do nosso estudo, temos um consumo mensal médio de 2000 kWh de iluminação no setor de pintura, sendo este responsável por 0,11% do consumo de energia elétrica do departamento.

1.5 Procedimentos Metodológicos

- Estudo da tecnologia de geração termoelétrica existente atualmente;
- medições de campo para estabelecer o fluxo médio de vapor pela tubulação;
- projeto e especificação da turbina apropriada, para maximizar o rendimento do conjunto gerador;
- levantamento das instalações elétricas de iluminação existentes;
- projeto das adequações necessárias na rede elétrica de iluminação, para possibilitar a alimentação pelo grupo gerador;
- projeto de sistema de comutação para garantir alimentação pela concessionária em caso de pane no gerador, garantindo a iluminação do setor;
- levantamento econômico da instalação do gerador, para determinação da viabilidade do projeto.

1.6 Estrutura do trabalho

O trabalho de conclusão de curso (TCC) apresenta a seguinte estrutura de capítulos, sendo dividido conforme as três disciplinas referentes ao TCC da Engenharia Elétrica, da seguinte forma:

- Metodologia Aplicada ao TCC: capítulo 1;
- Trabalho de Conclusão de Curso 1: capítulos 2;
- Trabalho de Conclusão de Curso 2: capítulos 3 a 5.

Capítulo 1: Introdução

Conforme normatização vigente contém a apresentação do trabalho, tema, delimitação do tema, problemas, premissas, objetivos, justificativas, e procedimentos metodológicos para a realização do mesmo.

Capítulo 2: Referencial Teórico

Referencia e citação de autores, trabalhos e teorias que abordem os todos os assuntos envolvidos em nosso TCC, desde definições básicas à tecnologias existentes e métodos de aplicação.

Capítulo 3: Estudo de Implantação

Definição dos parâmetros necessários para estabelecermos a energia cinética disponível no queimador de gases, para definirmos que tipo de equipamento gerador será utilizado.

Capítulo 4: Dimensionamento

Pesquisa e escolha do tipo de turbina que poderá ser utilizada na instalação, visando otimizar a conversão da energia cinética disponível, em energia elétrica para ser utilizada pelo departamento.

Pesquisa e definição do conjunto gerador que será instalado, para garantir a potência elétrica máxima que pode ser disponibilizada pelo conjunto mecânico.

Tabulação dos custos da instalação para comparação de “*payback*” e “IP” para estabelecer se a instalação será viável técnica e economicamente.

Capítulo 5: Conclusões Finais

Conclusão dos estudos e confronto dos objetivos específicos e gerais para verificar se foram atingidos, bem como apresentação a diretoria da automotiva, com a proposta de instalação, ou a declinação da viabilidade do projeto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia

Em nossa língua diária, frequentemente, fazemos o uso da palavra energia, a qual se apresenta em diversas formas na natureza. Por exemplo: os alimentos nos proporcionam energia química; a combustão da gasolina libera energia térmica, o que, num carro, em movimento (energia cinética); a energia elétrica é utilizada em diversos aparelhos, transformando-se em energia sonora, luminosa, mecânica, etc. (ALVARENGA, 2011).

Primeiramente, nos convém saber qual é o significado de energia, já que muitos sabem como funciona, mas poucos sabem defini-la. Definida pelo dicionário Aurélio “energia é a propriedade de um sistema que lhe permite realizar trabalho”. A energia pode ser convertida de uma forma em outra, porém não pode ser criada nem destruída, sendo a energia total do Universo constante.

Logo, o conceito de energia está relacionado à capacidade de produzir trabalho, causando modificações na matéria e, em muitos casos, de forma irreversível. Notavelmente, são várias as formas de energia: elétrica, sonora, potencial, solar, cinética, luminosa, nuclear, térmica, eólica, entre outras. Normalmente, estas energias não são obtidas diretamente da natureza, sendo necessária uma conversão para a obtenção das mesmas.

Historicamente, as fontes primárias eram convertidas diretamente para a forma de energia mecânica, sendo o foco das conversões em energia cinética e potencial. A energia elétrica ficou em evidência após a invenção e desenvolvimento do princípio de autoexcitação do “Dynamo”, criado por Werner Von Siemens e Charles Wheatstone, que convertia energia mecânica em energia elétrica. Esta invenção guiou as pesquisas para a criação de novas máquinas para o setor de conversões eletromecânicas, capazes de produzir grandes quantidades de energia (MESSERLE, 1969).

Em 2001, o Brasil vivenciou uma crise de abastecimento no setor elétrico. Entre as consequências positivas desta crise, sobressaíram-se duas constatações: a forte participação da sociedade na busca da solução, e o papel importante da eficiência no uso de energia. Em decorrência desse processo involuntário de aprendizagem, vem se formando uma consciência de

que a eficiência energética não pode estar vinculada apenas a questões conjunturais, mas deve fazer parte, de forma definitiva, da política energética nacional, por meio de ações que visem, por exemplo, agregar valor às ações já em andamento no País, desenvolver produtos e processos mais eficientes, e intensificar programas que levem à mudança de hábitos de consumo (ELETROBRÁS, 2005).

Os estudos que visam conservar, converter, e encontrar fontes alternativas de energia, são muito bem vistos e de grande importância nos dias de hoje, já que vivemos uma crise energética, apesar do MME e a ANEEL negarem que podemos estar vivenciando isto.

2.2 Tipos de Energia

A seguir são citadas e descritas as formas de energia que serão utilizadas como bases de estudos no presente trabalho.

2.2.1 Energia cinética

Energia cinética está associada ao movimento de um objeto ou partícula, que depende apenas da velocidade e da massa. A equação 1 representa a quantidade de energia cinética envolvida em um processo, onde “*m*” é a massa da partícula em movimento e “*v*” sua respectiva velocidade. A partir desta equação, pode-se dizer que o trabalho realizado sobre uma partícula é a variação da energia cinética (TIPLER, 2008).

Sendo a energia medida pelo trabalho realizado, tanto ela quanto o trabalho, são grandezas escalares, e sua unidade de medida no SI, é o Joule [J].

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

Onde:

E_c – Energia Cinética (J);

m – massa (kg);

v – velocidade (m/s).

Logo, tanto quanto maior for sua massa(m) ou sua velocidade(v), maior será a energia cinética desenvolvida pelo corpo.

Tratando-se de turbinas a vapor, a energia do vapor é transformada em energia cinética. Para isso, o vapor é obrigado a escoar através de pequenos orifícios denominados expansores, onde, devido à pequena área de passagem, adquire alta velocidade, aumentando a sua energia cinética, mas diminuindo, em consequência, a sua entalpia (energia).

2.2.2 Energia potencial

Energia potencial (gravitacional, elástica, elétrica, etc.), é aquela que um objeto possui em virtude da posição particular que ocupa. Ela se apresenta sob forma latente, podendo manifestar-se quando ocorrer uma condição especial (ALVARENGA, 2011).

Quando a energia está vinculada a uma altura, ela é chamada de energia potencial gravitacional e a mesma é dada pela equação 2 abaixo, e sua unidade de medida também é o Joule, já que toda forma de energia tem como unidade no SI o Joule.

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h \quad (2)$$

Onde:

E_{pg} – Energia potencial gravitacional (J);

m – massa (kg);

h – altura (m).

Quando a energia de um objeto está relacionada em consequência à posição em que ele ocupa, como por exemplo, na extremidade de uma mola comprimida, a energia neste caso é denominada de energia potencial elástica, definida pela equação 3:

$$E_{pe} = \frac{k \cdot x^2}{2} \quad (3)$$

Onde:

E_{pe} – Energia potencial elástica (J);

x – deformação da mola (m);

k – constante elástica da mola.

Outra situação em que um objeto possui energia potencial pode ser observada quando um objeto eletrizado é posto próximo a outro objeto também eletrizado, provocando a atração ou repulsão de ambos (ALVARENGA, 2011).

A energia cinética e a energia potencial são formas de energia denominadas energia mecânica (E_M). A energia mecânica total de um objeto é sempre dada pela soma das energias E_p e E_c , isto é:

$$EM = Ep + Ec \quad (4)$$

Onde:

EM – Energia mecânica (J);

Ep – Energia potencial (J);

Ec – Energia Cinética (J).

2.2.3 Energia térmica

Energia térmica é uma forma de energia associada diretamente à temperatura absoluta de um sistema, e corresponde, classicamente, à soma das energias cinéticas microscópicas que suas partículas constituintes possuem, em virtude de seus movimentos de translação, vibração ou rotação.

Assume-se um referencial inercial sob o centro de massa do sistema. Em sistemas onde há radiação térmica confinada, a energia de tal radiação também integra a energia térmica. A

energia térmica de um corpo macroscópico corresponde, assim, à soma das energias cinéticas de seus constituintes microscópicos, e das energias atreladas às partículas de radiação (fótons térmicos) por ele confinadas. À transferência de energia, impelida por uma diferença de temperaturas, de um sistema termodinâmico a outro, dá-se o nome de calor.

2.2.4 Energia elétrica

A energia elétrica é a capacidade de uma corrente elétrica realizar trabalho. Essa forma de energia pode ser obtida através da energia química ou da energia mecânica, através de turbinas e geradores, que transformam essas formas de energia em energia elétrica. Ela é obtida através da aplicação de uma diferença de potencial entre dois pontos de um condutor, gerando uma corrente elétrica entre seus terminais, sendo a principal fonte de energia do mundo, devido a sua facilidade de transporte, e baixo índice de perda energética durante a conservação.

A principal função da energia elétrica é a transformação desse tipo de energia em outros tipos, como, por exemplo, a energia mecânica e a energia térmica.

Para calcularmos a energia elétrica, usamos a equação (5) descrita abaixo, sendo P a potência e Δt a variação de tempo.

$$E_{el} = P \cdot \Delta t \quad (5)$$

No sistema internacional (SI), a energia elétrica é dada em Joule (J); porém, a unidade de medida mais utilizada é o quilowatt-hora (kWh).

Benjamim Franklin, cientista que estudou profundamente a eletricidade, já acreditava que ela era composta por cargas positivas e negativas. Após a evolução das pesquisas nesse ramo sobre os prótons e elétrons, atualmente, a definição da eletricidade já adota o conceito que ela é produzida pela liberação de elétrons de seu átomo (MILEAF, 1985). Essa liberação é relativa às propriedades físicas e químicas de cada elemento e material. Essa diferenciação é que define os materiais condutores, semicondutores e isolantes

Quando há o movimento desses elétrons, surge a corrente elétrica. O sentido desta corrente ocorre devido ao fato dos elétrons serem atraídos pelas cargas positivas. Por isso, quando se conecta um condutor entre o polo positivo e negativo de uma pilha, uma corrente elétrica circula por este condutor. Quanto maior for a quantidade de cargas negativas e positivas nas extremidades de um condutor, maior será a DDP e a intensidade de elétrons que serão repelidos.

2.3 Geração de energia

A energia elétrica tem progressivamente assumido crescente participação na matriz energética brasileira. Guardando estreita relação com o comportamento da economia nacional, a eletricidade tem sido um excelente indicador da performance da própria economia (TOLMASQUIM, 2005).

A facilidade de transporte da eletricidade, e seu baixo índice de perda energética durante conversões, incentivam o uso da energia em grande escala no mundo inteiro. Fontes renováveis, como a força das águas, dos ventos, ou a energia solar, e recursos fósseis, estão entre os combustíveis usados para a geração da energia elétrica. Por meio de turbinas e geradores, é possível transformar outras formas de energia, como a mecânica e a química, em eletricidade.

A energia elétrica que alimenta as indústrias, comércio e lares, é gerada principalmente em usinas hidrelétricas, onde a passagem da água por turbinas geradoras transformam a energia mecânica, originada pela queda ou vazão d'água, em energia elétrica.

Atualmente, o Brasil produz 8,5% de toda a eletricidade gerada no mundo, a partir de usinas hidrelétricas. Apenas China e Estados Unidos possuem parques hidrelétricos maiores que o brasileiro, embora outras formas de geração de energia elétrica sejam dominantes nesses países (TOLMASQUIM, 2005).

No Brasil, a geração de energia elétrica é 80% produzida a partir de hidrelétricas, 11% por termoelétricas, e o restante por outros processos. A partir da usina, a energia é transformada, em subestações elétricas, e elevada a níveis de tensão (69/88/138/240/440/525/765 kV) e

transportada em corrente alternada (60 Hz) através de cabos elétricos, até as subestações rebaixadoras, delimitando a fase de Transmissão. Já na fase de distribuição primária (11,9/13,8/23/33 kV), nas proximidades dos centros de consumo, a energia elétrica é tratada nas subestações, com seu nível de tensão rebaixado e sua qualidade controlada, sendo transportada por redes elétricas aéreas ou subterrâneas, constituídas por estruturas (postes, torres, dutos subterrâneos e seus acessórios), cabos elétricos e transformadores para novos rebaixamentos (110/127/220/380/440 V), e finalmente entregue aos clientes industriais, comerciais, de serviços e residenciais em níveis de tensão variáveis, de acordo com a capacidade de consumo instalada de cada cliente (CPN/SP, 2013), esquema visto na figura 6.

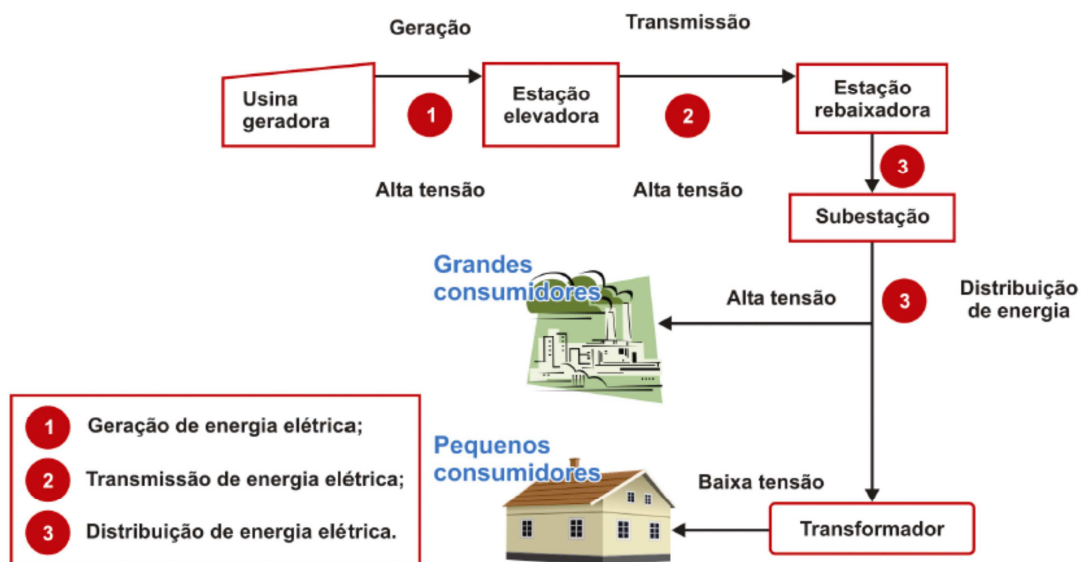


Figura 6: esquemático de geração e distribuição de energia elétrica
Fonte: CPN/SP, 2012.

Quando se fala em setor elétrico, referimo-nos normalmente ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), definido como o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica até a medição, inclusive, trabalhando com níveis de alta e baixa tensão e, normalmente, em C.A. a uma frequência de 60 Hz.

Conforme definição dada pela ABNT através das NBRs, considera-se baixa tensão a tensão superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 V em corrente contínua e igual ou inferior a 1000 volts em corrente alternada ou 1500 V em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra. Da mesma forma considera-se alta tensão, a tensão superior a 1000 V em corrente alternada ou 1500 V em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra.

2.3.1 Princípio de funcionamento

A característica principal de um gerador elétrico é transformar energia mecânica em elétrica. Para entender o funcionamento de um gerador, considere uma espira imersa em um campo magnético produzido por um ímã permanente. Sua operação está baseada no movimento relativo entre uma espira e um campo magnético. Os terminais da espira são conectados a dois anéis, que estão ligados ao circuito externo através de escovas. Este tipo de gerador é denominado de armadura giratória (WEG, 2006).

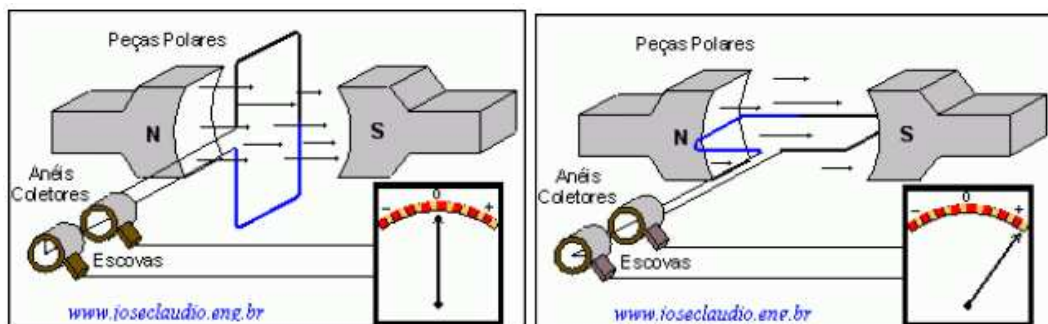


Figura 7: esquema de armadura giratória
Fonte: ENGEL, 2013.

Considerando que a bobina gira no sentido horário com velocidade linear dentro do campo magnético "B", também uniforme, e "v" é a velocidade linear do condutor em relação ao campo magnético, o valor instantâneo da f.e.m. induzida na espira em movimento de rotação é determinado pela equação "6" abaixo.

$$e = 2 \cdot B \cdot l \cdot v \cdot N \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

Onde:

e – f.e.m. (V);

B – indução do campo magnético (T);

l – comprimento ativo de cada condutor (m);

v – velocidade linear (m/s);

N – número de espiras;

θ – ângulo formado entre B e v.

A distribuição da indução magnética sob um polo é que determina a variação da tensão no condutor em função do tempo. E esta distribuição depende da forma da sapata polar (WEG, 2006).

Nos geradores de campo giratório (figura 8) a tensão de armadura é medida diretamente no enrolamento de armadura sem passar pelas escovas. Normalmente a potência de excitação destes geradores é inferior a 5% da potência nominal, e por este motivo, é mais utilizado (WEG, 2006).

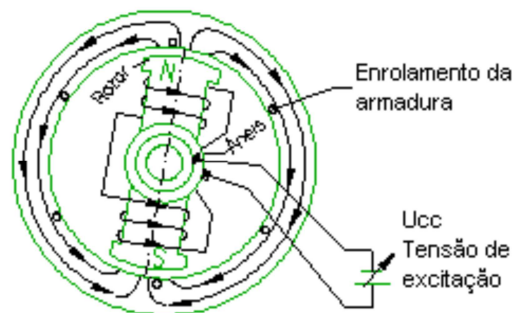


Figura 8: gerador com armadura fixa.
Fonte: WEG, 2006.

Para uma máquina de um par de polos, a cada giro das espiras, tem-se um ciclo completo da tensão gerada. Mas os enrolamentos podem ser construídos com um número maior de pares de polos, que se distribuirão alternadamente (um norte e um sul), e assim, tem-se um ciclo a cada par de polos (WEG, 2006).

2.4 Turbinas a vapor

Até o início do século XIX, a máquina a vapor alternada havia sido o motor térmico industrial mais difundido no mundo. Entretanto, este tipo de máquina a pistão não convertia a energia térmica em mecânica com altos níveis de eficiência; além disso, o movimento alternativo precisava ser convertido em movimento rotativo por intermédio de engrenagens e cardans, que consumiam energia e obrigatoriamente necessitavam de manutenção ao passar do tempo. Uma máquina a vapor que produzisse energia rotativa sem precisar de intermédios para isso, seria

amplamente utilizada, e por volta de 1880, este dispositivo surgiu com o nome de turbina a vapor. Os saltos tecnológicos, porém, ocorreram somente após a revolução industrial.

A turbina a vapor é definida como um motor térmico onde a energia termodinâmica contida no vapor é convertida em trabalho mecânico, e posteriormente em energia elétrica. A turbina é uma máquina de combustão externa, onde os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina, e realiza os processos de conversão de energia do combustível em potência no eixo. Devido a isto, apresentam uma flexibilidade em relação ao combustível a ser utilizado, podendo usar inclusive aqueles que produzem resíduos sólidos, como cinzas, durante a sua queima.

A seguir, são citadas as turbinas desenvolvidas e utilizadas.

2.4.1 Turbina de Laval

A primeira turbina a vapor foi desenvolvida e patenteada pelo sueco Carl Gustaf de Laval, e esta recebeu o nome de “Turbina de Laval”.

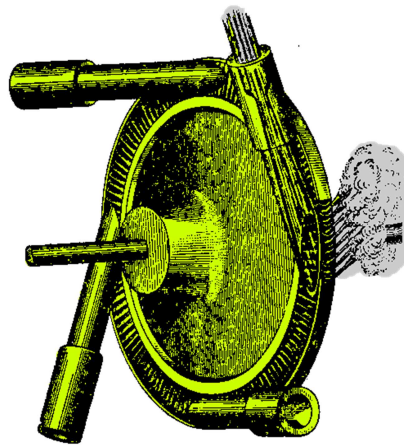


Figura 9: turbina de Laval
Fonte: Mazza (Unicamp), 2009.

A turbina de Laval consistia em uma turbina de ação com uma fileira única de pás, onde o vapor se expandia completamente em um único, ou nos vários bocais, ocasionando a maior velocidade possível, cerca de 43.000 rpm. Ainda assim foi considerada ineficiente por utilizar

uma grande quantidade de vapor para obter movimento (baixo rendimento), e logo em seguida acabou sendo abandonada pelo próprio inventor.

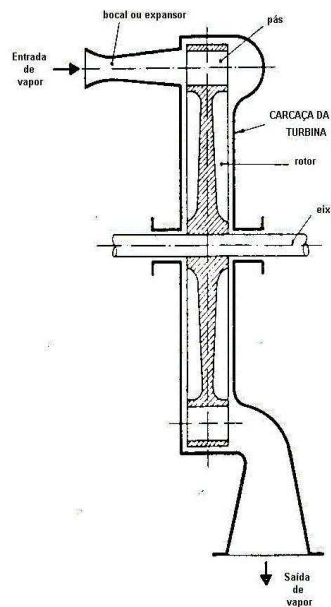


Figura 10: turbina de Laval (corte)
Fonte: Mazza (Unicamp), 2009.

2.4.2 Turbina Parsons

Um ano após a invenção de Laval, o inglês Charles Parsons começou a desenvolver uma turbina que gerasse eletricidade, que era uma turbina semelhante às hidráulicas existentes só que em vez de utilizar a água, usava o vapor como fluido operante. Nesta turbina, o vapor se movia paralelamente ao eixo da turbina, perdia pressão e ganhava velocidade antes de colidir com as pás. Enquanto na turbina de Laval, o vapor era usado em um único estágio (uma fileira de pás), a turbina Parsons continha vários estágios. Como a pressão do vapor diminuía à medida que percorria os estágios, os últimos estágios que recebiam vapor com baixa pressão, tinham pás maiores e de formatos diferentes dos primeiros.

2.4.3 Turbina Curtis

Em 1895, Charles Gordon Curtis patenteou uma turbina a vapor que combinava fluxo axial e radial do vapor. A turbina de Curtis empregava o escalonamento de velocidades.

Este tipo de escalonamento também é denominado escalonamento de velocidade, onde o vapor se expande completamente no bocal colocado na entrada. A velocidade conseguida pelo vapor ao expandir-se é aplicada em várias fileiras de pás.

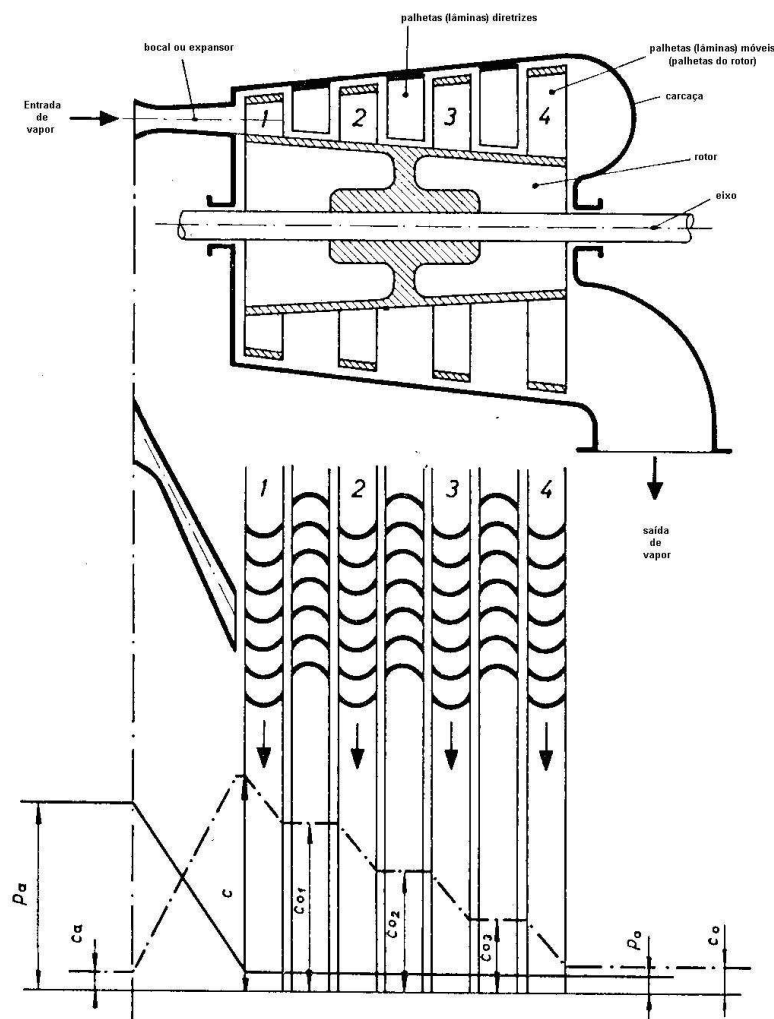


Figura 11: turbina Curtis

Fonte: Fontes Alternativas de Energia (UTFPR), 2013.

O jato de vapor chega com sua máxima velocidade na primeira fileira de pás; nesta, o vapor se expande até perder um quarto de sua velocidade total. Com a velocidade restante passa para a segunda fileira, sendo antes desviado pelas pás fixas (coroa diretriz), perdendo novamente um quarto de sua velocidade total. Após passar pela segunda fileira de pás com velocidade restante, passará novamente por outra coroa diretriz, mais uma fileira de pás e assim sucessivamente. Como em todos os escalões ou etapas passa a mesma quantidade de vapor, e sua velocidade vai diminuindo, torna-se necessário que as seções de passagem do vapor aumentem, aumentando assim os diâmetros das sucessivas fileiras de pás.

Como dito anteriormente, em uma turbina com uma única fileira de pás, adquire-se uma grande velocidade tangencial (ou periférica), na entrada da turbina, e se deseja uma pequena velocidade do vapor na saída. Este inconveniente desaparece com a turbina Curtis, pois pode partir com uma velocidade tangencial menor, ocasionando uma velocidade de saída da fileira elevada, sendo aproveitada nos escalões seguintes.

2.4.4 Turbina Rateau

No ano de 1986, o francês Auguste Rateau, elaborou uma nova turbina com o sistema de escalonamento de pressão, que consistia em várias turbinas simples montadas no mesmo eixo uma após a outra em série, fazendo com que ocorresse a queda de pressão parcial ou por escalonamento. Desta forma, vão intercaladas sucessivamente fileiras de pás ou coroas móveis com bocais ou coroas diretrizes, sendo que estas, além de expandir o vapor, o redirecionam para a aplicação na próxima fileira de pás.

O jato de vapor chega ao bocal sendo expandido e adquirindo a velocidade c_{01} . Após atingir a primeira fileira de pás, penetra em uma fileira de bocais ou na coroa diretriz, sendo novamente expandido e adquirindo a velocidade c_{02} , atingindo subseqüentemente a segunda fileira de pás. Após isso, penetra novamente em outra fileira de bocais ou coroa diretriz, e, sucessivamente, adquire a velocidade que é cedida a seguir, até utilizar quase que totalmente a energia disponível sob a forma de pressão.

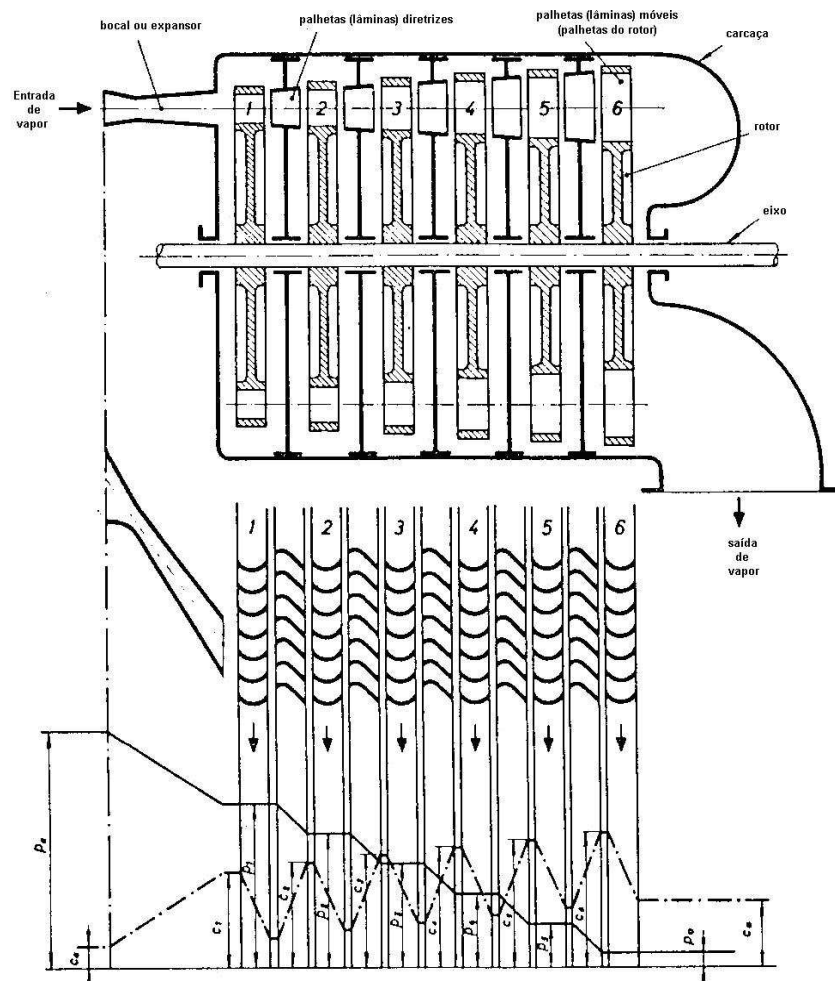


Figura 12: turbina Rateau

Fonte: Fontes Alternativas de Energia (UTFPR), 2013.

Como as diferenças de pressão utilizadas nos diferentes escalões são reduzidas, as velocidades adquiridas pelo vapor são pequenas, de forma que as perdas por atrito são reduzidas. Ou seja, com um bom rendimento, temos a velocidade do rotor dentro de limites convenientes.

Com estas velocidades reduzidas, além das perdas menores por atrito, temos a possibilidade de adotar um maior número de fileiras, sendo estas as principais vantagens do escalonamento de pressão frente ao escalonamento de velocidade.

Este sistema gerava menores rotações na turbina, permitindo a conexão direta ao gerador, sem ser necessário o uso de engrenagens ou correias. O maior inconveniente destas turbinas está justamente na vedação que é mais crítica, não somente pelas maiores pressões encontradas em

seu interior, sobretudo pelas diferenças de pressão entre fileiras, que ocasionam perdas intersticiais, além do empuxo axial que deve ser previsto nos mancais da mesma.

2.5 Equipamentos envolvidos na instalação

As instalações de energia e cogeração são compostas de vários equipamentos, cada um com uma devida função e características de funcionamento. A seguir são apresentados os principais equipamentos necessários para um sistema geração a vapor, para fins de entendimento e funções de cada um.

2.5.1 Caldeira

A caldeira é um recipiente metálico sob pressão responsável pela produção do vapor a partir do aquecimento do fluido vaporizante. Para fornecer energia, na caldeira é utilizado a queima do carvão, óleo ou gás natural. A energia química destes combustíveis é convertida em calor durante a combustão, fazendo com que a energia calorífica seja absorvida pelo vapor.

A caldeira estacionária a vapor é todo e qualquer equipamento fixo, destinado a produzir vapor de água sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte externa de calor (SPERANDIO, 2001).

O rendimento de uma caldeira pode variar de 70 a 90%, dependendo de suas características construtivas, acessórios e, principalmente, do combustível utilizado no aquecimento.

As partes constituintes de uma caldeira são:

- **fornalha:** também chamada de grelha, é o local onde ocorre a queima do combustível sólido, líquido ou gasoso; deve ocorrer a queima total do combustível e a extração do calor proveniente das reações de combustão;

- **superaquecedor:** é responsável pela elevação da temperatura de vapor d'água saturado, causando assim o aumento de sua entalpia; o motivo de ter o vapor superaquecido é para que o fluido não condense nos corpos de baixa pressão, evitando a corrosão no interior da turbina;
- **economizador:** tem a finalidade de elevar a temperatura da água de alimentação, objetivando a obtenção de um rendimento maior do gerador de vapor, e evitar choques térmicos excessivos, que possam danificar os materiais (SPERANDIO, 2001).
- **pré-aquecedor:** trocador de calor que tem o objetivo de aquecer o ar que será utilizado na queima do combustível, aproveitando o calor restante dos gases da combustão, ocasionando um aumento de rendimento da caldeira por melhoria da queima do combustível.
- **chaminé:** responsável pela circulação dos gases quentes da combustão pelo efeito de tiragem natural, e também pela liberação dos gases para a atmosfera; as chaminés são bastante elevadas e são projetadas para que o ar poluído seja apanhado pelas correntes superiores da atmosfera e poluam outros lugares mais distantes (SPERANDIO, 2001).

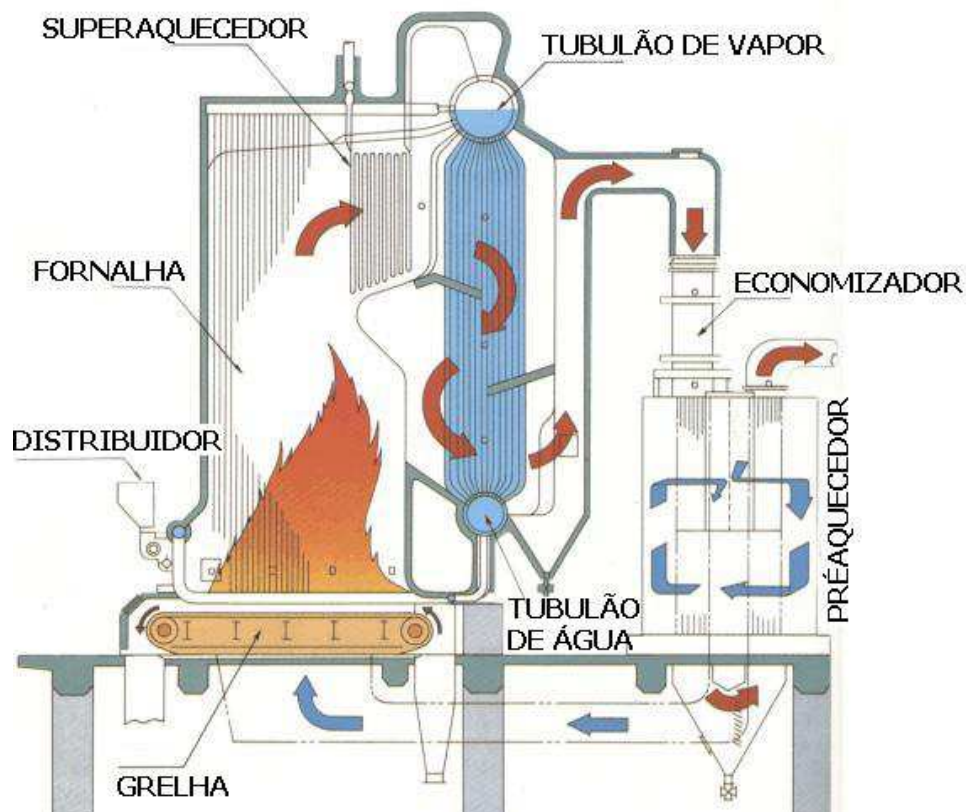


Figura 13: fluxo do vapor
Fonte: Fontes Alternativas de Energia (UTFPR), 2013.

Uma caldeira típica tem forma cúbica e dimensões de 18 m por 40 m e talvez 60 m de altura. O interior da caldeira está essencialmente vazio; as paredes são compostas de quilômetros de tubos ociosos redondos. O líquido de trabalho, água, enche as tubulações. No alto da caldeira as tubulações se juntam em um vaso cilíndrico, chamada de cilindro ou tubulão de vapor. Este é o lugar onde o “vapor úmido” é gerado. O vapor então entra no superaquecedor, uma série de inúmeros tubos, onde é aquecido muitos mais. O vapor superaquecido sai então da caldeira para as turbinas de vapor. A pressão da caldeira pode ser de 160 bar e estar em uma temperatura de 550 °C.

Segundo SPERANDIO (2001), existem diversas formas de nomenclatura de caldeiras de acordo com a sua capacidade de produção de vapor. A tendência atual é expressar sua capacidade em quilos ou toneladas de vapor por hora, no sistema métrico. As caldeiras podem ser classificadas em diversas formas, mas são resumidas em dois grandes grupos:

- caldeiras de tubos de água;

- caldeiras de tubos de fumaça.

As caldeiras de tubos de água, também chamadas de aqua-tubulares, têm água circulando dentro dos tubos e os gases da combustão circulando pelo lado de fora. Seu princípio de funcionamento está baseado na circulação natural de água, mantida pela diferença de densidade causada pela diferença de temperatura entre os conjuntos de tubos.

A figura 14 ilustra o princípio de funcionamento das caldeiras aqua-tubulares, que quando os tubos A estiverem a uma temperatura maior que a dos tubos B, a densidade de água em A será menor que em B, causando a movimentação de água no sentido indicado pela flecha H.

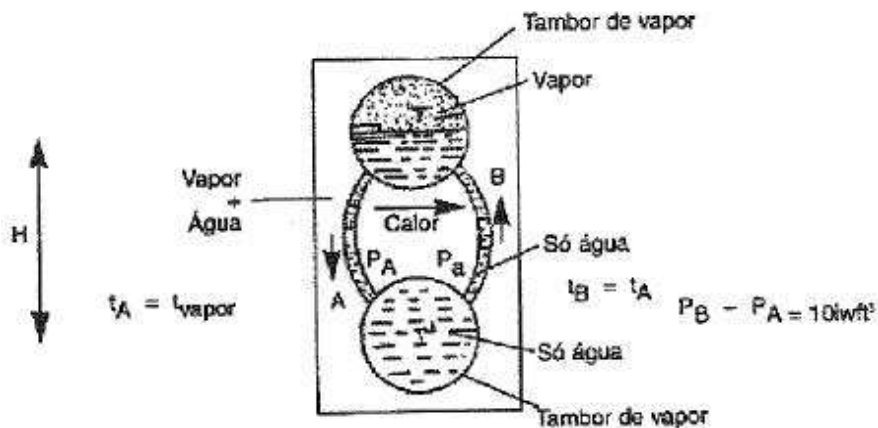


Figura 14: fluxo de água na caldeira aqua-tubular

Fonte: SPERANDIO, 2001.

As caldeiras de tubos de fumaça também são conhecidas como flamo-tubulares, e são essencialmente metálicas, tendo o processo combustivo dentro da própria caldeira, dentro do tubo-fornalha, que pode atingir um diâmetro de até 90 cm. Após a queima do combustível, os gases quentes passam a percorrer os tubos internamente, onde fornecem calor à água que se encontra fora dos mesmos, aquecendo até que se atinja a vaporização (SPERANDIO, 2001).

2.5.2 Turbina a vapor

Como citado anteriormente, a turbina a vapor é um motor térmico de combustão externa que transforma a energia térmica em energia mecânica, e quando acoplada a um gerador, transforma a energia mecânica em energia elétrica. As turbinas a vapor são muito utilizadas em centrais térmicas convencionais e usinas nucleares para a geração de eletricidade.

As turbinas a vapor contêm seis dispositivos fundamentais que são vistos na figura 15. São eles:

- **estator:** é o elemento fixo na turbina, que envolve o rotor, cuja função é transformar a energia potencial do vapor em energia cinética através dos distribuidores;
- **rotor:** é a roda giratória com pás na sua regifão periférica; as pás adquirem energia cinética proveniente dos bocais de vapor, modificando assim a sua direção e a velocidade deste vapor;
- **expansor:** é nos expansores que a energia da pressão do vapor se transforma em energia cinética; estes dispositivos são constituídos por um ou mais bocais ou expansores;
- **palhetas:** são chamadas de palhetas móveis as fixadas no rotor, e palhetas fixas, as fixadas no estator; estas tem função de orientar o vapor para a próxima coroa de palhetas móveis; aquelas tem a finalidade de receber o impacto do vapor proveniente dos expansores para a movimentação do rotor;
- **carcaça:** é o suporte das partes estacionárias, tais como diafragmas, palhetas fixas, etc; na grande maioria das turbinas são de participação horizontal, o que facilita a manutenção da mesma;
- **mancais:** são responsáveis pelo posicionamento axial do conjunto rotativo em relação às partes estacionárias da máquina, e pela manutenção das folgas axiais.

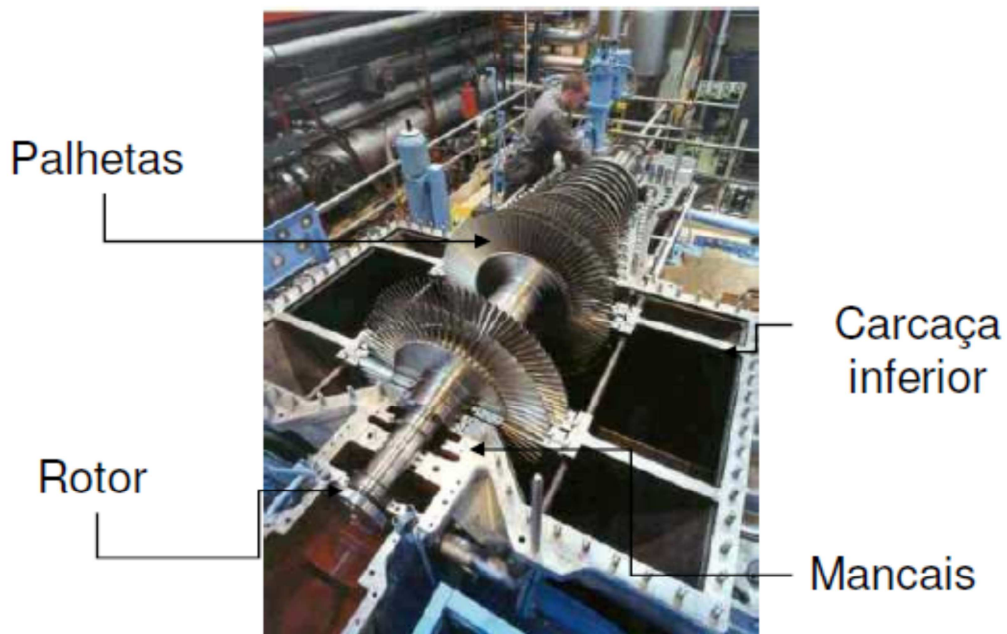


Figura 15: partes componentes
Fonte: Máquinas Térmicas (UFPR), 2010.

O desempenho das termelétricas a vapor pode ser avaliado através dos ciclos termodinâmicos do vapor d'água, cujas características são usualmente apresentadas em diagramas de estado, como o de Mollier (entalpia vs entropia), ou outros similares, como temperatura x entropia (Dos Reis, 2003).

Ainda, segundo Reis, o ciclo térmico fundamental aplicável às termelétricas a vapor é o de Carnot (duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas), e o ciclo base para as aplicações práticas é o Rankine.

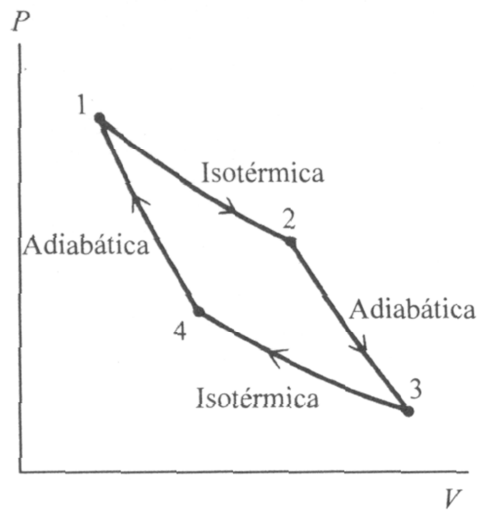


Figura 16: ciclo de Carnot
Fonte: Dos Reis, 2003.

Sobre o ciclo de Rankine, demonstrado abaixo, o gráfico apresenta variação conforme o processo da turbina a vapor. No caso de turbinas onde o vapor é aquecido durante o processo, a reta formada pelos pontos 3 e 4 modula crescendo para fora da curva.

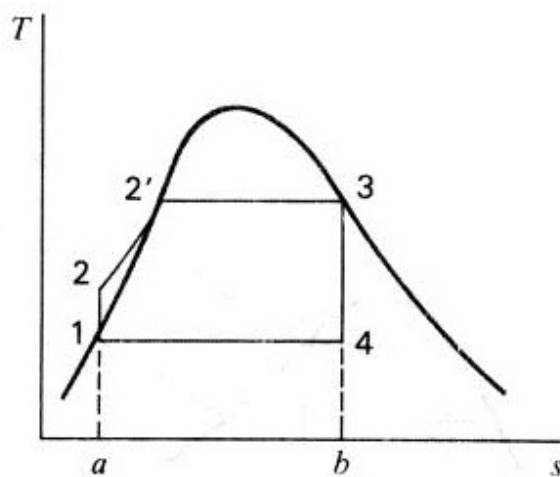


Figura 17: ciclo de Rankine sem superaquecimento de vapor
Fonte: Dos Reis, 2003.

Normalmente a classificação das turbinas a vapor é feita segundo o modo de atuação do vapor na mesma. Assim as turbinas são classificadas em:

- turbinas de ação;
- turbinas de reação.

As turbinas de ação são aquelas em que o vapor tem sua expansão somente ocorrendo nos bocais; já as turbinas de reação têm parte dos expansores nos bocais e a outra parte nas próprias pás do rotor.

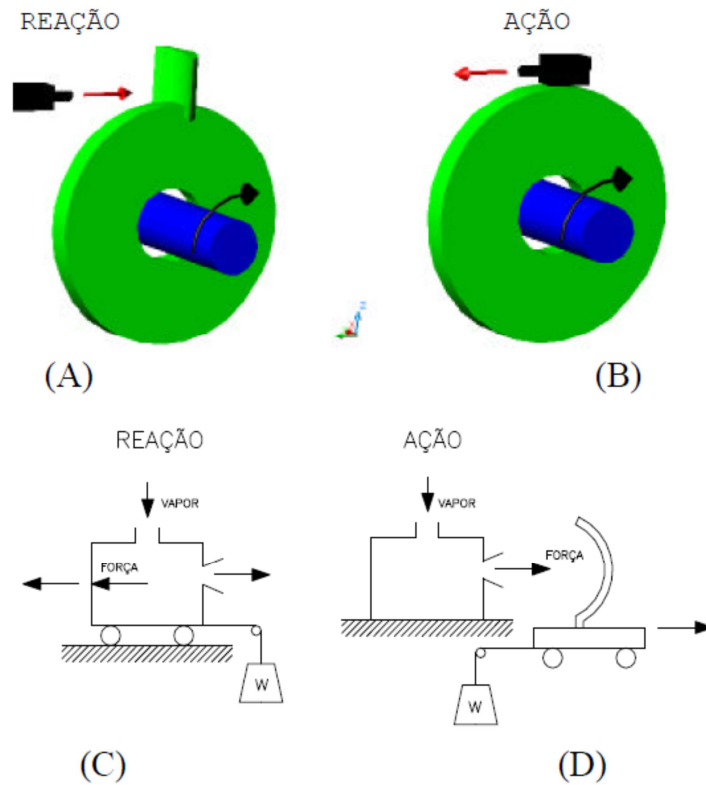


Figura 18: (A e C) – turbina e princípio de ação; (B e D) – turbina e princípio de reação

Fonte: Máquinas Térmicas (UFPR), 2010.

Se o expansor for fixo e o jato de vapor for direcionado contra um anteparo móvel, a força de ação do jato do vapor irá deslocar o anteparo, na direção do jato, levantando o peso W . Se, entretanto, o expansor puder mover-se, a força de reação que atua sobre ele, fará com que se desloque, em direção oposta do jato de vapor, levantando o peso W . Em ambos os casos, a energia do vapor foi transformada em energia cinética no expansor, e esta energia cinética, então, convertida em trabalho.

Outra maneira de dividir as turbinas é conforme o escalonamento ocorrido. São eles:

- escalonamento por velocidade (Turbina Rateau);

- escalonamento por pressão (Turbina Curtis);
- Escalonamento misto.

Os dois primeiros escalonamentos já foram descritos, e cabe agora definir as turbinas de escalonamento misto.

A turbina mista é a utilizada atualmente, pois ela aproveita a vantagem dos escalonamentos de velocidade (pouca diferença de pressão) e dos escalonamentos de pressão (poucas perdas por atrito). Elas contam com várias fileiras de pás, algumas com escalonamentos de velocidade e outras com escalonamento de pressão, fazendo com que recebam o nome de turbinas mistas ou de duplo escalonamento. Estas turbinas trabalham com alguns corpos de ação, e outros de reação. Hoje em dia, as grandes turbinas a vapor são mistas, reservando geralmente o escalonamento de velocidade para a zona de alta pressão, e o escalonamento de pressão para zonas de média e baixa pressão.

As turbinas a vapor também podem ser classificadas, segundo as condições do vapor de escape, a forma de escape do vapor será basicamente de quatro maneiras:

- **turbina de escape livre:** a turbina de escape livre expulsa o vapor diretamente para a atmosfera, sendo a pressão do vapor de saída igual à pressão atmosférica;
- **turbina com condensador:** neste caso o vapor sai da turbina e entra em um condensador, no qual condensa-se o vapor, diminuindo sua pressão para ser injetado novamente na caldeira, completando assim o ciclo fechado;
- **turbina de condensação com uma ou duas extrações controladas:** conhecida também como ciclo combinado, tem basicamente o mesmo funcionamento do sistema das turbinas que possuem somente condensação, porém ocorre a extração de uma determinada vazão de vapor com uma pressão superior à pressão atmosférica, sendo que esta pressão é definida de acordo com a necessidade do processo da indústria;
- **turbina de contrapressão:** a turbina tem o vapor de escape com uma pressão superior à pressão atmosférica; neste caso, o vapor é utilizado em processos industriais.

Estas configurações já são amplamente utilizadas na Europa e nos Estados Unidos e nos últimos 15 anos têm se difundido em grande escala no mercado brasileiro.

2.5.3 Gerador

Para gerar energia elétrica é necessário o uso de um gerador acoplado à turbina a vapor. A energia mecânica necessária para fazer girar o campo do gerador provém da turbina a vapor, e estes são acoplados um ao outro através dos eixos, fazendo com que a energia mecânica da turbina vire energia elétrica no gerador.

O gerador é constituído por uma espira plana que possui a liberdade de se mover sob a ação de um campo magnético uniforme. Essa espira gira em torno de um eixo perpendicular na direção das linhas de força do campo magnético aplicado. A variação do valor do fluxo que atravessa a espira móvel induz nela uma forma eletromotriz; logo, esta f.e.m. é resultante do movimento relativo que ocorre entre a espira e o campo magnético produzindo uma corrente alternada.

2.5.4 Turbogeneradores

Nas centrais térmicas, o gerador utilizado recebe o nome de turbogenerador que difere dos demais, por possuir um rotor de polos lisos (polos no interior do rotor), e também por apresentar o eixo do rotor na horizontal.



Figura 19: turbogerador WEG
Fonte: WEG, 2013.

A maioria dos turbogeradores possui dois ou quatro polos causando uma elevada velocidade de rotação, que no Brasil, por ter uma frequência de operação normalizada de 60 Hz, normalmente é de 1800 rpm ou 3600 rpm, valores que são obtidos através da fórmula 7, abaixo descrita.

$$N = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (7)$$

Onde:

N – velocidade de rotação (rpm);

f – frequência de operação (Hz);

p – número de polos.

A utilização do turbogerador em centrais térmicas é devido ao fato da turbina a vapor apresentar um melhor rendimento em alta rotação, não ocasionando tantas perdas de energia térmica. Normalmente, os fornecedores de geradores elétricos trabalham com um rendimento de 96%, quando o turbo gerador está aplicado direto ao eixo da turbina a vapor.

2.5.5 Características construtivas

De acordo com a WEG Turbogeneradores, o turbogenerador é formado pelas partes constituintes descritas abaixo.

- **Carcaça:** sua função principal é apoiar e proteger o turbogenerador, alojando também o pacote de chapas e enrolamentos do estator.
- **Estator:** é a parte ativa magnética estática do turbogenerador; é constituído por um pacote laminado de chapas de aço silício e onde, em suas ranhuras, as bobinas que formam o enrolamento do estator, são alojadas; o núcleo do estator é montado diretamente na carcaça.
- **Rotor:** o rotor consiste das partes ativas giratórias, compostas por um pacote de chapas de aço prensado, o enrolamento de campo e o enrolamento de amortecimento.
- **Mancais:** em função da aplicação, os turbogeneradores podem ser fornecidos com mancais de rolamentos ou mancais de deslizamento.
- **Mancais de deslizamento:** os mancais de deslizamento podem ter lubrificação natural (auto-lubrificáveis) ou lubrificação forçada (lubrificação externa).
- **Mancais de rolamentos:** estes mancais são normalmente constituídos de rolamentos de esferas ou de rolos cilíndricos, dependendo da rotação e dos esforços axiais e radiais a que são submetidos, sendo que em algumas aplicações podem ser utilizados rolamentos especiais; os mancais de rolamentos podem ser lubrificados a óleo ou graxa.
- **Excitatriz *brushless* (sem escovas):** os turbogeneradores com sistema de excitação *brushless* possuem uma excitatriz principal girante, normalmente localizada em um compartimento na parte traseira do turbogenerador; o estator da excitatriz principal é alimentado em corrente contínua pelo regulador de tensão, e o rotor da excitatriz principal alimenta o enrolamento de campo do turbogenerador, através de uma ponte retificadora trifásica girante.
- **Excitação *brushless* com excitatriz auxiliar (PMG):** a excitatriz auxiliar ou PMG (Permanent Magnet Generator), é um pequeno gerador incorporado aos turbogeneradores *brushless* WEG com a função de alimentar o circuito de potência do regulador de tensão.

O rotor da PMG, instalado no eixo do turbogerador, é constituído por um pacote de chapas onde são alojados os ímãs permanentes. O estator da PMG é montado normalmente na carcaça do compartimento externo, onde também é instalado o estator da excitatriz principal.

- **Excitação *brushless* sem excitatriz auxiliar:** este tipo de excitação é opcional para turbogeradores WEG. O turbogerador não possui excitatriz auxiliar (PMG), e o circuito de potência do regulador de tensão é alimentado através do transformador de excitação conectado aos terminais principais do turbogerador. O transformador de excitação pode ser instalado na caixa de ligação do turbogerador (sob pedido) ou no painel de excitação do cliente (WEG Turbogeneradores, 2012).

2.5.6 Refrigeração

Existem duas principais formas de refrigeração nos turbogeradores, e elas são: turbogeradores abertos autoventilados, e turbogeradores fechados com trocador de calor ar-água (WEG Turbogeneradores, 2012).

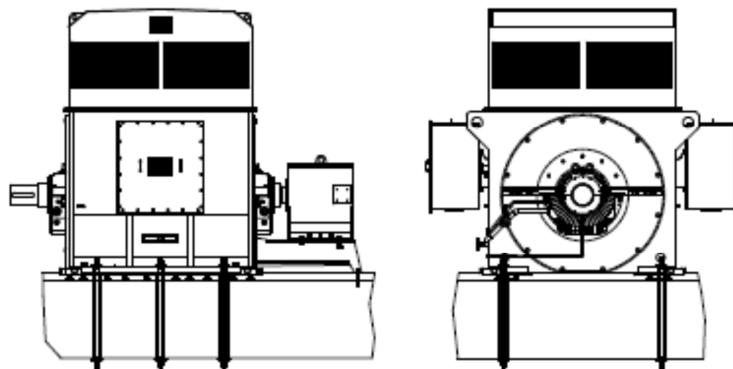


Figura 20: turbogerador aberto autoventilado.
Fonte: WEG, 2012.

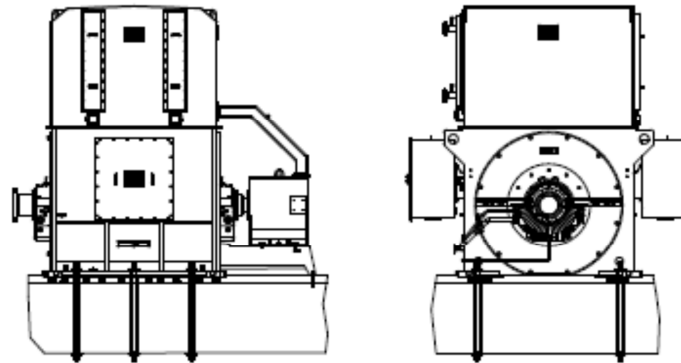


Figura 21: turbogerador aberto autoventilado.
Fonte: WEG, 2012.

Conforme a WEG, além dos tipos de refrigeração citados, os turbogeradores podem ser fornecidos com ventilação forçada, fechados com trocador de calor ar-ar, entrada e saída de ar por dutos e outros meios de refrigeração.

2.5.7 Torres de resfriamento

A torre de resfriamento, também chamada de torre de refrigeração, é o trocador de calor responsável por resfriar o fluido quente usado na geração de eletricidade. A troca de calor se dá por evaporação.

A figura 22 ilustra o princípio do funcionamento de uma torre de refrigeração.

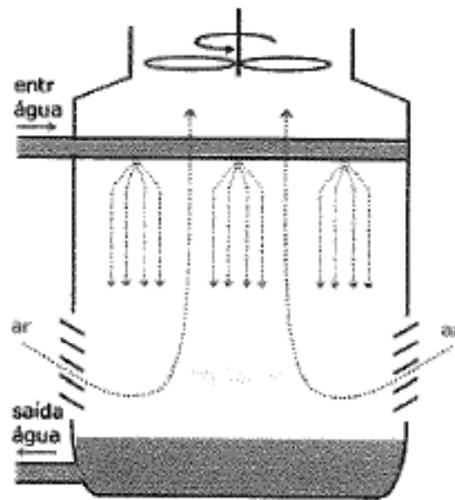


Figura 22: funcionamento da torre de resfriamento
Fonte: TERMODINÂMICA, 2007.

Um ventilador do topo da torre cria um fluxo ascendente de ar que encontra o fluxo descendente da água, fazendo com que este contato crie duas parcelas de troca de calor: a sensível, devido ao aumento de temperatura do ar, e a latente, devido à evaporação da água (Termodinâmica, 2007).

As torres de refrigeração têm seu trabalho derivado do seu formato. A forma da torre de refrigeração é chamada “venturi”. Para compreender como trabalham as torres, é necessário saber que o ar se move para cima através da torre de refrigeração, e a seção transversal da torre diminui, fazendo com que aumente a velocidade do ar ascendente, e diminua a pressão, aumentando o efeito de sucção, de ar do fundo da torre para o topo. Este fluxo constante de ar refrigera a água, que depois irá resfriar o vapor. A principal parcela da água provida destas torres passa pelo interior dos tubos do condensador, trocando calor com o vapor que passa por fora destes tubos, condensando assim o vapor. No retorno deste ciclo, a água está mais quente e então é resfriada.

2.5.8 Condensador

O vapor extraído dos corpos de baixa pressão da turbina a vapor entra no condensador. O condensador é essencialmente um trocador de calor operado em condições próximas ao vácuo, para maximizar a queda de pressão do vapor na turbina melhorando a eficiência da instalação, pela transformação do vapor em baixas pressões em líquido novamente.

No outro lado do condensador, a água resfriada nas torres de refrigeração é bombeada no condensador, retirando o calor do vapor de baixa pressão, permitindo a mudança do estado gasoso para o líquido. Há uma transferência de calor do circuito primário para o circuito secundário. O líquido do circuito secundário é água não tratada ou água do mar.

O condensador pode ser do tipo “*tube and tube*” composto basicamente de um tubo de cobre por onde circula o vapor, montado internamente a outro, onde circula água para o resfriamento. Para reduzir espaço na instalação, os tubos são montados em formato espiral (TUMA, 2005).

2.5.9 Redutor de velocidade

O redutor de velocidade é um equipamento composto por um conjunto de engrenagens, que tem a função de transformar a rotação do eixo da turbina a vapor, normalmente entre 5.500 e 6.000 rpm, e acionar o gerador elétrico através da aplicação de rotação ao eixo deste gerador, que é de 1800 rpm no caso de centrais térmicas. Normalmente os redutores de velocidade apresentam um rendimento de 98%.

2.5.10 Bomba de alimentação da caldeira

A bomba de alimentação da caldeira irá bombear a água que foi condensada de volta à caldeira. Se a caldeira trabalhar com pressões de 150 ou mais bar (150 vezes a pressão atmosférica), então a bomba deverá ter a capacidade de bombear água a essa pressão; por conta disso, essas bombas costumam ser muito grandes, acionadas por motores elétricos ou pequenas turbinas a vapor exclusivamente dedicadas a elas.

2.6 Cogeração

2.6.1 Introdução à cogeração

Estamos presenciando hoje em dia, um aumento cada vez mais importante da incorporação da cogeração aos sistemas elétricos de potência, que vem do fato de que ela aumenta a oferta de energia elétrica, por meio de um uso mais eficiente do combustível, que já é utilizado no atendimento das linhas de transmissão.

Além desse uso eficiente do combustível, a cogeração também contribui para o controle do efeito estufa, e colabora muito para a implementação aprofundada de um modelo sustentável de desenvolvimento.

Têm ocorrido muitas mudanças na legislação brasileira que estão sendo relevantes para a prática da cogeração de energia elétrica, e ainda, viabilizando o comércio da venda de excedentes de energia elétrica, que são produzidos por autoprodutores de energia elétrica, tornando assim, o produtor independente de energia elétrica mais presente nesse novo layout do setor elétrico brasileiro.

2.6.2 Questão ambientalista

O mundo, do ponto de vista energético, ainda baseia-se no modelo de desenvolvimento na utilização de combustíveis fósseis, em sua maioria, o carvão mineral e principalmente os derivados do petróleo. Mas esse modelo já vem sendo alvo de críticas sob muitos aspectos, principalmente sob o impacto ambiental que causa.

Essa preocupação com o meio ambiente relacionada com o uso de uma “melhor” geração de energia (energia limpa) é um avanço no modelo de desenvolvimento da humanidade, que em prol de uma modificação do modelo energético busca uma maior utilização de tecnologias eficientes, com ênfase ao uso de fontes renováveis. Com isso, o gás natural, que é um combustível fóssil menos nocivo ambientalmente que outros em questão, tem sido considerado como uma ponte para o predomínio do uso de energia “limpa”.

O petróleo, juntamente com suas consequências para o meio ambiente, é um importante alvo na conscientização ambiental. A combustão do hidrocarboneto causa sérios problemas ambientais como poluição atmosférica, chuva ácida, fuligem, aquecimento do globo terrestre (o efeito estufa), e a deterioração a camada de ozônio.

A substituição do petróleo pelo gás natural já é uma importante ação do consenso ambientalista, pois representa o uso de uma energia mais limpa, principalmente na geração de eletricidade. Para termos uma ideia, o domínio da gasolina nos meios de transporte já está sendo contestado, e outros tipos de combustíveis mais limpos já estão substituindo aos poucos. As próprias companhias de petróleo estão reformulando gasolinas “verdes”, que são menos poluidoras, e ainda diversas autoridades governamentais estão incentivando a pesquisa de combustíveis alternativos para os veículos, tais como: metanol, álcool e gás natural comprimido, inclusive a eletricidade.

Em base, a cogeração de energia deve ser inserida no contexto de uma “maior eficiência na utilização da energia”, no qual, com a cogeração, pode-se obter conjuntamente a energia elétrica, vapor, ou energia mecânica e calor, a partir de um mesmo elemento energético. A cogeração traz ainda uma contribuição num problema muito sério, que é o efeito estufa, onde,

com o uso dela, cogeração, podemos obter o não aumento ou até diminuição do efeito estufa, que até então está sendo uma preocupação geral com o aumento que está acontecendo.

2.6.3 A contribuição da cogeração no controle do efeito estufa

A ideia do efeito estufa foi primeiramente divulgada por um francês chamado Jean-Baptiste Fourier, que viveu entre 1768 e 1830, e comparou a camada de gases envolvente na Terra a uma estufa de plantas. O modo como certos gases retêm calor na atmosfera deu o nome de “efeito estufa”. O efeito estufa é um fenômeno natural, que não é preocupante à atmosfera, mas o aumento desse efeito causado pelas atividades humanas é extremamente preocupante e deve ser evitada.

Mais ou menos metade da luz solar chega à superfície terrestre e transfere energia para o solo e a água, a superfície então, emite essa energia sob a forma de calor, principalmente radiação infravermelha. Como o ar contém como seus principais componentes, o oxigênio (21%) e o nitrogênio (78%), a maior parte dessa energia emitida da superfície é irradiada para o espaço com dificuldades. Mas quase 90% dessas radiações de calor são retidas por gases e nuvens, e então remetidas novamente para baixo.

Um dos elementos que mais contribui para o agravamento do efeito estufa é o vapor d’água, que retém a maior quantidade de raios infravermelhos; depois vem o dióxido de carbono (CO₂), o qual, em sua maioria, é produzido pela queima de combustíveis fósseis. Outros gases que também contribuem muito para o efeito estufa são o metano, os óxidos de nitrogênio e os halocarbonos.

Segundo apontamentos de cientistas do IPCC (Dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças de Clima), feitos em reunião promovida pela ONU (Organização das Nações Unidas), aproximadamente sete bilhões de toneladas de gases do efeito estufa são liberados por ano. Eles ainda garantem que a reabsorção desses gases é de cerca de três bilhões de toneladas, menos da metade liberada. Com isso a quantidade acumulada na atmosfera chega a quase três e meio

bilhões de toneladas de gases, provocando assim um aumento na temperatura do planeta, e, conseqüentemente, o agravamento do efeito estufa.

Carros e fábricas do mundo industrializado são os principais responsáveis por essa liberação desses gases (60%), sendo os maiores causadores do aquecimento exagerado da Terra. A geração de energia elétrica em centrais termelétricas e, principalmente, o setor de transportes, atingem o segundo nível de maiores causadores dos gases do efeito estufa e, portanto, do aquecimento global.

Com isso, se pretende implantar a cogeração na geração termelétrica, procurando diminuir o efeito estufa por meio da seguinte medida: quando possível, obter a energia elétrica em um sistema de cogeração, pois assim ter-se-ia um uso mais eficiente do energético, isto é, produziria a energia elétrica gastando menor quantidade de combustível, o principal emissor de gases do efeito estufa.

Com tudo, os governos poderiam adotar várias medidas para a redução dos gases do efeito estufa, entre elas:

- estimular a troca do carvão e do petróleo por combustíveis menos poluentes, como o gás natural e a biomassa;
- incentivar a implantação, quando viável, de plantas de cogeração;
- melhorar o transporte público;
- incentivar o uso de fontes primárias renováveis, tais como: hidrelétricas, solares, eólicas, e células de combustível, que não produzem gases estufa;
- criar tributos que aumentariam o preço de combustíveis poluentes, reduzindo suas vendas;
- incentivar a criação de tecnologias automotrizes mais eficientes, como motores híbridos.

2.6.4 A cogeração para o uso mais eficiente da energia

A cogeração começou a ser incentivada na década de 70, nos Estados Unidos. No Brasil também há incentivos à cogeração, ao menos em relação à legislação.

Por definição, a cogeração é uma instalação na qual se produz, de forma combinada, a energia elétrica e energia térmica (calor ou vapor), por meio do uso sequencial da energia a partir de um só combustível.

Temos dois tipos de instalações de cogeração:

- *topping cycle*: é a mais usual, e consiste na produção de energia mecânica/elétrica por meio de uma máquina térmica que descarta calor para um processo qualquer. Primeiramente, gera-se a energia mecânica/elétrica, para depois o calor ser recuperado na caldeira de recuperação.

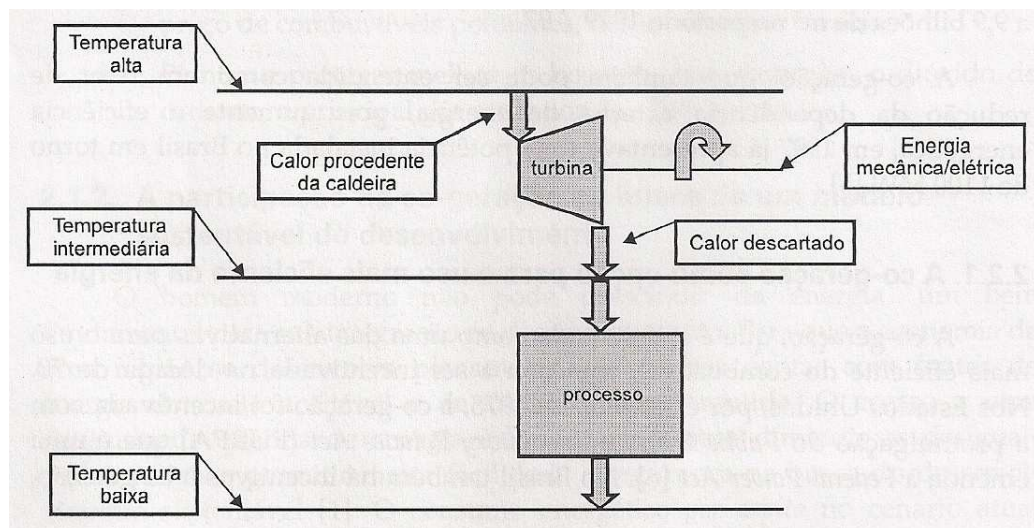


Figura 23: instalação de cogeração do tipo “topping cycle”

Fonte: CLEMENTINO, 2001.

- *bottoming cycle*: menos comum, em que o calor a altas temperaturas, rejeitado por processos industriais, é aproveitado para gerar energia mecânica ou elétrica. Primeiramente, o recurso energético produz vapor utilizado antes para produção de energia mecânica/elétrica, e depois, é repassado ao resto do processo.

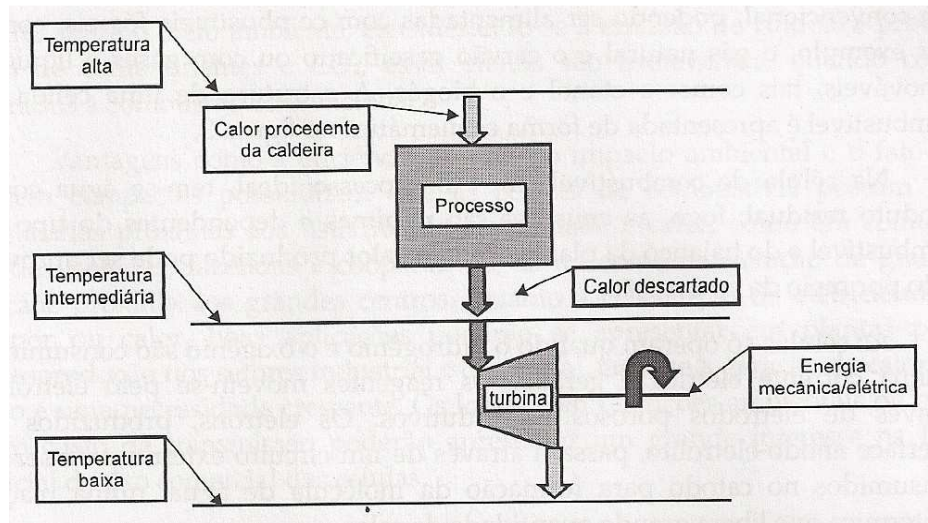


Figura 24: instalação de cogeração do tipo “bottoming cycle”

Fonte: CLEMENTINO, 2001.

Portanto, nos dois tipos mencionados, existe a cogeração, pois o fato de o vapor produzido servir para gerar energia elétrica, e ao mesmo tempo atender ao processo inicial a que se destinava, caracteriza um uso eficiente de energia.

2.6.5 A cogeração e o sistema elétrico de distribuição

Unidades de cogeração são muito vantajosas ao sistema elétrico de distribuição, por exemplo, no caso de autoprodutores, que podem fornecer a energia elétrica excedente gerada para o suprimento de cargas próximas deles. A geração distribuída também é uma situação interessante, pois tem a capacidade de alimentar grande parte das cargas presentes na região em que essas unidades geradoras distribuídas são instaladas.

2.6.6 A cogeração nas indústrias

Existem muitas atividades industriais que fazem o uso da energia térmica, podendo ser frio ou calor. Na maioria das vezes a necessidade de calor predomina, sobretudo na agroindústria e na indústria de transformação. Com relação ao frio, o seu emprego é no congelamento, pelos segmentos de frigoríficos e sucos, e na climatização de ambiente em fiação e tecelagem.

A cogeração pode ser aproveitada no fato da atividade necessitar de energia térmica para produção na linha de processo, e ao mesmo tempo fazer a produção de energia mecânica, a qual serve para acionar um compressor ou bomba, ou então um gerador de energia elétrica. Do ponto de vista empresarial/industrial, a cogeração significa diminuição de custos, reduzindo a dependência energética.

Cresce cada vez mais o interesse do setor industrial pela cogeração, especialmente visando a autossuficiência de suas instalações, proporcionando uma melhor utilização dos recursos energéticos.

2.6.7 A cogeração em outros setores de economia

A cogeração também se encontra interessante em setores mais dinâmicos e em expansão no setor terciário. A chegada de novas tecnologias no processo de cogeração abre inúmeras possibilidades de melhoria da eficiência energética em muitos setores da economia. Encontra-se cada vez mais comum, a aplicação de cogeração em shopping centers, hotéis, clubes, penitenciárias, aeroportos e demais estabelecimentos que consomem energia sob a forma de calor (ou refrigeração) e eletricidade, proporcionando redução dos custos e melhoria da produtividade.

2.6.8 Situação da cogeração no Brasil

Até o momento, as principais atividades associadas à cogeração no país são:

- agricultura: empresas agroindustriais que utilizam resíduos agrícolas;
- química: indústrias químicas;
- petroquímica: refinarias e polos petroquímicos;
- papel: indústrias de papel e celulose;
- siderurgia: siderurgias que utilizam os gases de alto-forno;
- outros: empreendimentos como hotéis, shopping centers, bancos e outros estabelecimentos comerciais.

No setor de agricultura, a sua maior potência encontra-se nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo; este último contém 60% do total da potência instalada. No setor de papel, os Estados da Bahia, Espírito Santo e São Paulo são os responsáveis por 70% da potência instalada. No setor petroquímico, os Estados da Bahia, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e São Paulo, são os responsáveis pela concentração da totalidade das instalações. E por último, no setor da siderurgia, os Estados do Espírito Santo, Minas Gerais e São Paulo representam 100% da potência instalada. Todos esses setores mencionados, juntos, correspondem a 94,85% do total da potência instalada no Brasil.

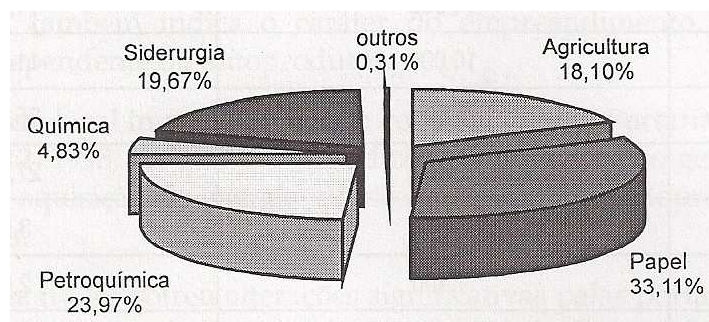


Figura 25: situação da cogeração no Brasil em relação à atividade associada ao processo

Fonte: CLEMENTINO, 2001.

Os dados do gráfico abaixo totalizam uma potência aproximada de 1100 MW, situação da energia por meio de cogeração no Brasil, segundo referência do ano de 1997.

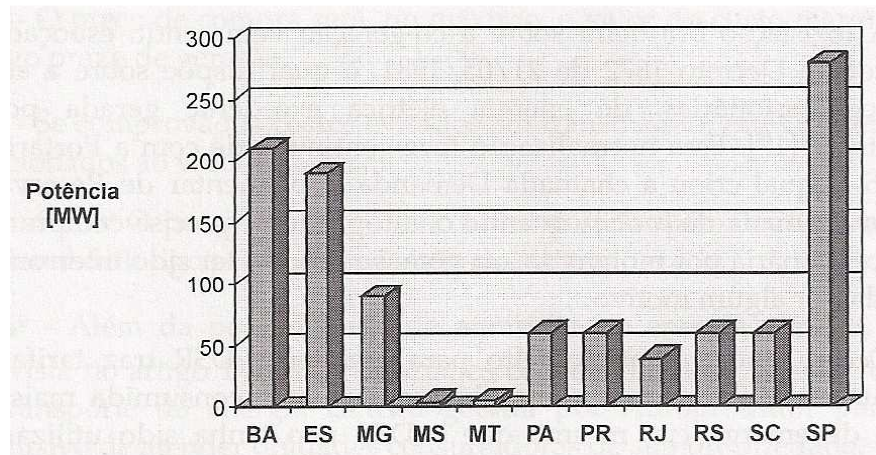


Figura 26: situação da cogeração no Brasil – distribuição da potência instalada por estado

Fonte: CLEMENTINO, 2001.

2.6.9 Legislação da cogeração no Brasil

Desde 1981, a legislação brasileira de cogeração vem sendo implementada, e dispõe sobre a aquisição, pelas concessionárias, de energia elétrica excedente gerada por autoprodutores. No ano de 1985, criou-se a chamada Demanda Suplementar de Reserva (DSR), ou “*backup*”, impondo que o autoprodutor necessita comprar energia da concessionária por motivo da sua geração própria ter sido interrompida ou reduzida por razão qualquer.

O grande problema é que o contrato realizado para respeitar a DSR, trouxe tarifas de valor muito alto, cobrando, além da energia consumida, a tarifa mensal de emergência, mesmo a DSR não estar sendo utilizada. Para esse tipo de contrato também vale a tarifa de ultrapassagem.

Outro documento legal importante para a cogeração foi a Portaria do DNAEE, que mostrou a figura da cogeração, e que regulamenta a aquisição de energia elétrica excedente do autoprodutor pelas concessionárias. Essa portaria sofreu alterações significativas, deixando seu artigo 1º da seguinte forma: “Autoriza a aquisição de energia elétrica de Autoprodutores em contratos de longo prazo que:

- não usem derivados do petróleo como combustível, com exceção dos sistemas de cogeração;

- assegurem contratos de no mínimo 10 (dez) anos de suprimento” (CLEMENTINO, 2001).

Alguns outros artigos da Portaria nº 246, já mencionada, também sofreram algumas modificações, como:

Artigo 6º – O preço de compra será, no máximo, o valor do custo marginal de longo prazo de geração (CLEMENTINO, 2001).

Artigo 7º – Se comprovados custos evitados em transmissão (CLEMENTINO, 2001).

Parágrafo único: O preço nunca poderá ser maior do que o custo marginal regional de longo prazo de expansão do sistema (CLEMENTINO, 2001).

Artigo 24º – Além da possibilidade de aquisição de energia elétrica, como prevista no artigo 1º desta Portaria, os concessionários poderão realizar o transporte de energia elétrica gerada por Autoprodutor, para fim exclusivo de atender unidades consumidoras de sua propriedade (CLEMENTINO, 2001).

Dez anos depois, veio a lei nº 8987/95, que definiu o regime de concessão e permissão para os prestadores de qualquer serviço público, tendo como base o artigo 175 da Constituição Federal. Depois disso, tornou-se obrigatório o contrato entre os empreendedores e o órgão regulador.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) surgiu com a promulgação da lei 9427/95. Com o aparecimento do mercado de livre comercialização no setor de energia elétrica, viu-se necessário a criação da lei nº 9648/98, que instituiu o Operador Nacional do Sistema (ONS) e o Mercado Atacadista de Energia (MAE).

2.6.10 Layout do setor elétrico brasileiro

No novo layout do setor brasileiro encontram-se os agentes tradicionais deste setor, os consumidores livres ou cativos, assim como o gerador, distribuidor e o transmissor. As figuras

do PIE e do AP foram inseridas pela Lei 9074/95, e a figura do Agente Comercializador foi introduzida pela Lei 9427/96. Por último, introduziram-se as figuras dos agentes importador e exportador de energia elétrica pela Lei 9648/98.

Essa nova dinâmica do setor brasileiro tem por objetivo a promoção da livre concorrência, atendendo as necessidades de consumo interno e de conservação de energia.

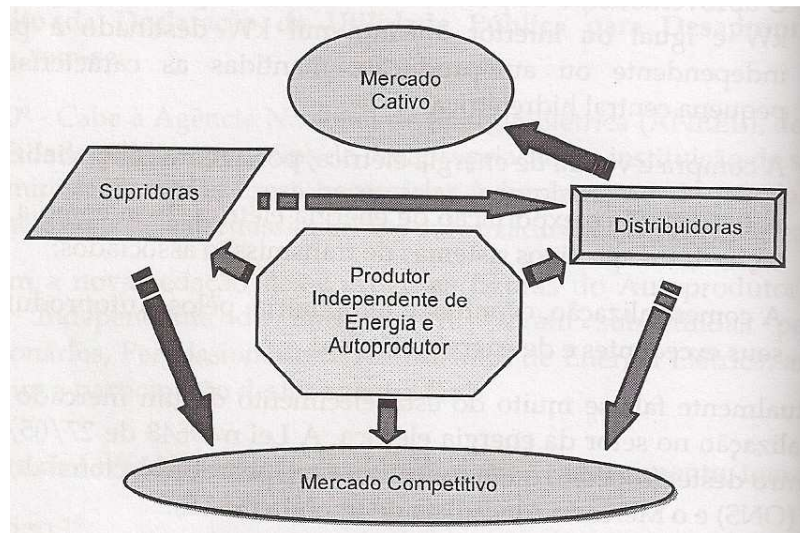


Figura 27: “layout” do setor elétrico brasileiro
Fonte: CLEMENTINO, 2001.

2.6.11 Alternativas tecnológicas para cogeração

Para cogeração, vários tipos de equipamentos podem ser adotados, desde simples turbinas a vapor acopladas a caldeiras convencionais, até sistemas mais complexos, como gaseificadores em conjunto com turbinas a gás. Existem várias denominações para a cogeração de acordo com os equipamentos, arranjos e combustível utilizados, tendo por objetivo, cada um deles, um maior rendimento energético global.

Turbina a vapor em contrapressão: é um arranjo convencional dos sistemas de cogeração (Ciclo Rankine), alimentada por uma caldeira dotada de um superaquecedor. A geração de trabalho é relativamente pequena, rejeitando quantidades maiores de calor comparadas com

outras tecnologias. A principal aplicação desse sistema é nas indústrias que compram combustível e não possuem excedente ao utilizar combustível próprio.

Turbina a vapor a condensação: nesse sistema, o vapor na saída da turbina, vai para o condensador, após condensado retorna à caldeira. A aplicação dessa tecnologia ocorre em indústria que tenha combustível barato e não tenha necessidade de vapor no processo.

Turbina de condensação e extração: nessa tecnologia existem pontos de derivação de pressões intermediárias na turbina, os quais extraem vapor para atender ao processo.

Turbina a gás simples: é o arranjo mais interessante devido as suas características: capacidade de expansão modular; simplicidade na implantação dos módulos; menor tempo de comissionamento; investimento reduzido; e elevado fator de disponibilidade. Sua principal característica é a exigência de um combustível nobre, seja gasoso (por exemplo: gás natural) ou líquido (por exemplo: diesel ou óleos leves). Um dos atrativos da turbina a gás para a cogeração é que os gases de escape possuem grandes teores de oxigênio, além de serem volumosos e com temperaturas elevadas, fatores esses que facilitam indiretamente a geração de vapor.

Turbina a gás em ciclo combinado: nesse sistema o vapor da caldeira de recuperação expande-se em turbinas a vapor de contrapressão, de condensação ou mistas, gerando energia elétrica adicional.

Turbina a gás com injeção de vapor: surgiu na década de 1980. Com o aparecimento das turbinas aeroderivativas, foi introduzido o sistema de reinjeção do vapor na própria turbina a gás, isto é, o vapor que vem da caldeira de recuperação, transfere calor para os gases a alta pressão que deixam o compressor. Esse acontecimento proporciona uma geração de eletricidade complementar no próprio gerador, e reduz a emissão de óxidos de nitrogênio. Essas unidades aeroderivativas fazem com que haja um aumento na operação da instalação, uma alta confiabilidade, uma menor quantidade no tempo de manutenção, e um alto rendimento. Essas vantagens são muito atrativas para um sistema de cogeração e, ainda, na geração elétrica para atendimento de picos de demanda, ou funcionamento em regime de emergência.

2.6.12 Viabilidade de um “sistema de cogeração”

Para investir em um projeto de cogeração, antes é preciso realizar análises técnico-econômicas. São analisados os montantes de receitas captadas anualmente ao longo da vida contábil de uma central de cogeração, para depois de subtrair as despesas e encargos, verificar o retorno líquido do capital investido.

Esse retorno líquido varia com relação ao tipo de tecnologia de geração de energia elétrica utilizado, como turbina a vapor em contrapressão, turbina a gás simples, turbina a gás em ciclo combinado, entre outros.

2.7 Variáveis financeiras de projetos

2.7.1 Valor presente líquido (VPL)

Podemos definir o valor presente líquido como o valor real presente de fluxo de caixa de projeto e seu custo inicial; nos casos em que o VPL é positivo, sugere-se que há viabilidade para o projeto, levando-se em conta uma taxa de desconto esperada, e, analogamente um valor negativo, sugere que não há viabilidade para o projeto e que portanto não se justificaria o investimento.

Partindo então da premissa que o VPL deve ser positivo para viabilidade de um projeto, podemos utilizar a seguinte equação:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (8)$$

Onde:

t: Número de anos do projeto

n: total número de anos contábeis do projeto

FC_t : Fluxo de caixa no ano t (R\$)

i : Taxa de desconto (%)

I_0 : investimento inicial (\$)

2.7.2 Taxa interna de retorno (TIR)

Podemos estabelecer uma relação muito estreita entre o VPL, e a TIR que podemos obter quando o VPL foi igual a zero, estabelecendo-se assim a máxima taxa de desconto permitida para um projeto para assegurar a viabilidade do mesmo. Agregamos assim mais um critério de avaliação de viabilidade de um projeto: a TIR tem que ser maior que a taxa de desconto considerada, além é claro da VPL ser maior que zero.

Considerando a equação:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 \quad (9)$$

Onde:

t : Número de anos do projeto

n : total número de anos contábeis do projeto

FC_t : Fluxo de caixa no ano t (R\$)

i : Taxa de desconto (%)

I_0 : investimento inicial (\$)

2.7.3 Média ponderada de custo de capital

A Média Ponderada de Custo de Capital (WACC – Weighted Average Cost of Capital) é o que a empresa faz para chegar ao custo total do capital disponível para investimento; é a média ponderada dos custos dos diversos componente de um investimento, entre eles podemos citar:

dívida, patrimônio líquido e títulos híbridos, que são utilizados para os financiamentos das necessidades financeiras da empresa.

Estarão incluídos no WACC todas as fontes de capital de uma empresa, tais como: ações da bolsa de valores, fundos e quaisquer outros tipos de débitos a longo prazo.

WACC é o mínimo retorno que uma empresa deve perceber para satisfazer seus investimentos, e suprir credores, proprietários, e outros provedores de capital.

O cálculo é mais elaborado quanto maior for a complexidade da estrutura de capital da empresa; exemplificando com uma situação simples de o financiamento ser exclusivamente com débito e capital próprios, temos a equação:

$$WACC = \left(\frac{E}{D + E}\right) \cdot C_e + \left(\frac{D}{D + E}\right) \cdot C_d \cdot (1 - t_c) \quad (10)$$

Sendo:

C_e : Custo de capital próprio

C_d : Custo de débito

E : Valor de mercado do capital próprio da empresa

D : Valor de mercado da empresa

T_c : Imposto corporativo.

O WACC pode ser também empregado como a taxa de desconto i de um projeto para extrair o fluxo de caixa e desta forma se obter o VPL; seguindo esta linha podemos dizer que se outro critério para viabilidade de um projeto é que a taxa de retorno interna (TIR) seja maior que o custo do capital (WACC), ou seja:

$$TIR > WACC$$

O que parece bastante óbvio, pois em qualquer projeto temos que garantir que o retorno financeiro compense qualquer débito adquirido.

2.7.4 Retorno sobre investimento

O Retorno Sobre Investimento (ROI – *Return On Investment*), pode ser utilizado para se assegurar a eficiência de um investimento ou como base de comparação entre outras possíveis alternativas que possam se apresentar. Temos uma série de alternativas para este cálculo, e podemos empregá-las de acordo com o caso a ser considerado; em termos gerais, podemos considerar.

$$ROI = \frac{(\text{Ganho sobre investimento} - \text{Custo do investimento})}{\text{Custo do investimento}} \quad (11)$$

Por se tratar de um indicador bastante simples e versátil, este é muito popular, e determinante na decisão de se consolidar o investimento, se o ROI não for positivo, podemos excluir este investimento, pois o mesmo não é viável. Devemos também comparar as diversas alternativas, se houverem, e escolher a que obtiver o maior ROI para seguir com as próximas etapas.

2.7.5 Tempo de retorno de capital

O tempo de retorno (*Payback*) é o tempo que há entre o investimento o pagamento total do capital investido, ou seja, quando o lucro líquido se iguala ao valor do investimento.

O payback pode ser: (i) nominal, se for utilizado para o cálculo o fluxo de caixa com valores nominais, e; (ii) presente líquido, se no cálculo for considerado o fluxo de caixa trazidos para o valor presente (normalmente utilizando o WACC).

Como este método não considera os riscos presentes, como financiamentos, variação de mercado, custo de oportunidade do projeto, entre outros, passa a ser bastante limitado.

Temos a seguinte condição para obtenção:

$$Payback = T \text{ quando } \sum_{t=0}^T FC_t = I_0 \quad (12)$$

Onde:

FC_t : Fluxo de caixa no ano t (R\$);

I_0 : investimento inicial (\$).

A melhor opção é tomada quando temos o menor tempo de *payback*, pois quanto menor o tempo de retorno, menor é o risco do investimento, menos sujeitos a variações externas estará o investimento; além do mais, quanto mais rápido o investimento retornar, mais rapidamente estará disponível para outras aplicações; por isto o critério deve ser preenchido antes de tomar a decisão de investimento.

2.7.6 Variáveis particulares de decisão

Cada empresa estabelece critérios particulares de decisão sobre investimentos, além é claro dos estabelecidos em literatura especializada. A seguir serão expostas as particularidades da empresa que esta sob análise.

RAI (Reveu d`Analyse Inicial): é um suporte de orientação para os envolvidos geográfica e tecnicamente em um projeto, para que se possam ser apresentadas diversas possibilidades para a solução do problema.

PLANO DE INVESTIMENTO: estabelece os investimentos necessários de cada direção da empresa, e estabelece o plano global da empresa. As previsões de custos globais da empresa servem de balizamento para seu estabelecimento, e a alta direção da empresa terá como subsídio para estratégia a ser adotada.

BAI (*Budget* Anual de Investimento): é preparado com base no plano de investimento, sendo um elemento de *budget* anual de cada unidade ou direção. O BAI é o total de investimentos liberados anualmente a cada direção.

REPREVISÕES: o comitê de investimento pode a qualquer momento independentemente do mês se utilizar das reproviseões para alterar um budget de investimento,

adequando-o as necessidades momentâneas, e redirecionando o fluxo de investimento em cada direção da empresa.

2.7.7 Critérios para aprovação de investimentos

Na empresa que se aplicará o estudo, são quatro os critérios de viabilidade econômica de um investimento:

- valor presente líquido (antes e depois dos impostos);
- taxa interna de rentabilidade (TIR);
- índice de profiabilidade (IP);
- *Payback* ou retorno de investimento: o *payback* obrigatoriamente tem que ser menor que um ano; caso contrário, o investimento é negado compulsoriamente, havendo somente duas exceções: impacto ambiental e melhoria significativa na qualidade do produto; nesses aspectos, pode até ser aceito um *payback* maior que um ano.

3. ESTUDO DE IMPLANTAÇÃO

3.1 Introdução ao estudo

Como este trabalho tem o objetivo de verificar a viabilidade de instalação de um sistema de geração no processo de queima de solventes para expelir os gases limpos à atmosfera, nesta etapa do projeto definimos os aspectos necessários, assim como os cálculos de viabilidade econômica, para implantar e dimensionar corretamente o conjunto turbina-gerador que se adeque a quantidade de energia térmica disponível nos queimadores. Sendo assim, aqui verificamos se é viável ou não, tanto na prática quanto em aspectos econômicos, a implantação da central térmica no setor de pintura da automotiva.

Esta prática de implantação de termelétrica em indústrias é muito utilizada em usinas sucroalcooleiras e madeireiras fabricantes de lâminas e compensados, pois necessitam de uma grande quantidade vapor a alta temperatura e pressão em seus processos para secagem de madeira, destilação do álcool e o cozimento do açúcar. Ambos os casos se enquadram na prática de cogeração.

O combustível principal utilizado nas caldeiras das usinas de álcool é a queima do próprio bagaço da cana, resíduo sólido que remanesce da moagem da cana-de-açúcar nas usinas de açúcar e destilarias de álcool etílico, utilizando assim toda a matéria prima disponível e na maioria das vezes conseguem gerar energia para atender totalmente a necessidade demandada no processo, atingindo assim a autoprodução. Ademais, a melhora na eficiência na queima do bagaço não traz qualquer impacto ambiental negativo, porque continua queimando a mesma quantidade já existente, e apresenta um grande potencial a ser alcançado, que lhe permitiria participar de uma fração próxima a 10,0% da oferta de energia elétrica nacional. Para viabilizar a expansão regular dessa nova fonte é necessário rever os atuais paradigmas do setor elétrico e criar um ambiente de atração para o novo negócio (CONAB, 2011).

Nas unidades sucroalcooleiras, seu estágio de evolução na geração elétrica ainda é primário e, portanto, é possível prever não apenas a melhora da eficiência energética das unidades atuais, como também um crescimento contínuo, por muitos anos, da extensão dos canaviais cultivados e da disponibilidade de bagaço para ser queimado em suas caldeiras. O

limite dessa capacidade de geração, quase imprevisível hoje, depende de um conjunto de variáveis econômicas, decisões empresariais e, também, da edição de políticas públicas inteligentes que ajudem a transformar as possibilidades em resultados concretos.

A geração elétrica derivada da queima do bagaço não é novidade no setor sucroalcooleiro. De fato, a cogeração de energia elétrica, como uma prática rotineira nas unidades sucroalcooleiras, já tem décadas de existência. Essa tradição não é uma exclusividade brasileira e faz parte do processo industrial em todos os países que desenvolvem essa atividade. A grande novidade está na geração de excedentes exportáveis para o sistema elétrico nacional, que somente em tempos recentes está se transformando em negócio corrente e a maior parte de seu potencial ainda está por ser explorado.

Essa forma de usar o bagaço tem uma explicação simples: ele está disponível em grandes volumes no mesmo local das fornalhas e grelhas queimadoras e, praticamente, não tem uso alternativo remunerador. Essa energia limpa, renovável e de baixo custo é um fator importante para explicar a grande vantagem competitiva do açúcar fabricado com o caldo da cana-de-açúcar frente a seu concorrente, o açúcar fabricado com a beterraba açucareira. Este argumento vale também para o etanol extraído do caldo da cana quando cotejado com todos os seus sucedâneos, extraídos do amido das plantas amiláceas, como o milho e o trigo, ou de plantas sacarinas, como a beterraba.

Tratando-se de madeiras, os combustíveis utilizados na queima são o cavaco e pó-de-serra, produzidos pela moagem de toras de madeiras que não são utilizadas no processo de laminação. Normalmente essas toras tomam este rumo por não terem atingido o tamanho necessário para ir para a laminadora e assim é moída e vira combustível para ser queimado na caldeira e produzir o vapor a alta pressão e temperatura, utilizado no processo de secagem da cola usada no compensado produzido.

Antigamente, as indústrias madeireiras não se utilizavam destes resíduos cuja disposição final se tornou grande problema, pois eram queimados a céu aberto, lançando na atmosfera toneladas de monóxido de carbono (CO), altamente tóxico e nocivo ao meio ambiente, contribuindo para o aumento do efeito estufa. Ademais, a disposição destes resíduos em “lixões” provocam a contaminação do solo e do lençol freático, devido a substâncias químicas lixiviadas pela chuva.

Difícilmente uma madeireira consegue produzir toda a energia necessária para o seu consumo, pois nem toda a madeira vira cavaco para a queima, mas já atingem uma participação na produção de eletricidade para sua necessidade.

A venda do excedente de energia elétrica como novo negócio, de forma bastante tímida, surgiu no final dos anos 80. Somente passou a ser seriamente discutida como uma fonte alternativa interessante a partir de 2001, quando o país passou por sérias dificuldades de oferta de energia e foi necessária a implementação de um severo programa de racionamento no consumo da energia elétrica e de racionalização de seu uso. As novas políticas públicas editadas a partir dessa época passaram a valorizar as fontes que requerem prazos curtos para instalação e funcionamento dos projetos e fontes alternativas de baixa emissão de carbono (CONAB, 2011).

A partir desse episódio de forte impacto sobre a economia brasileira, surgiram várias iniciativas públicas e privadas para estimular sua implementação. Algumas unidades de produção se interessaram pelo novo negócio e trocaram seus equipamentos, instalando caldeiras de maior resistência e temperatura mais elevada, de modo a melhorar o aproveitamento energético do bagaço e disponibilizar uma quantidade maior de vapor útil e de energia térmica. O ganho em quantidade de vapor, medido em quilos, é bastante expressivo e cresce com a dimensão das caldeiras. Além disso, é necessário observar que todo o excedente de vapor é destinado a mover as novas e modernas turbinas e geradores, gerando eletricidade disponível para venda a terceiros (CONAB, 2011).

O objetivo deste trabalho é seguir este processo feito por madeireiras e principalmente por sucroalcooleiras verificando se é ou não possível implantá-lo em automotivas que tenham este processo de produção de vapor, não com o objetivo de buscar a autossuficiência, mas quem sabe alguma participação significativa que supra a energia demandada para a iluminação comum do prédio, e que traga benefícios econômicos especificamente à automotiva em questão.

3.2 Tecnologia de geração

A central termelétrica, produtora independente de energia, utilizará o vapor de água produzido através da queima do solvente utilizado na tinta aplicada nos veículos como combustível. A chama dos queimadores utiliza o gás natural como combustível principal para a queima, mas sendo o solvente uma substância também inflamável, também atua como combustível para a queima do próprio gás tóxico.

O processo se dará da seguinte forma:

1. O vapor a alta pressão e temperatura proveniente da chaminé de saída do queimador acionará o conjunto turbogerador, com uma turbina de condensação;
2. Como a produção desta energia elétrica se dará através do processo de ciclo térmico de condensação, “ciclo de Rankine”, a energia contida no vapor na entrada da turbina se transformará em energia mecânica para o acionamento do gerador de energia elétrica;
3. A turbina, que estará conectada ao gerador, transmitirá a energia mecânica até o gerador e este será o responsável por transformar a energia mecânica em energia elétrica e assim fornecer eletricidade ao sistema.

A figura a seguir exemplifica de forma simplificada o processo de funcionamento de uma central termoelétrica:

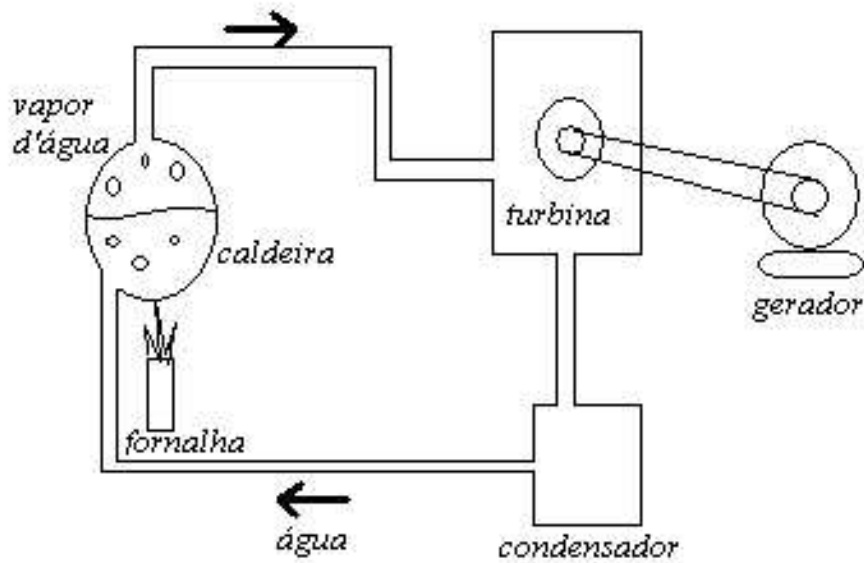


Figura 28: princípio de termogeração
Fonte: Máquinas Térmicas (UFPR), 2010

Em nosso estudo a função conjunto fornalha/caldeira, representado na imagem acima, deverá ser feito pelo queimador, pois este é o equipamento que produz o vapor uma vez que tenha a vazão e pressão suficiente para conseguir mover a turbina.

Como este trabalho já visa o reaproveitamento do vapor, será dispensado o uso do condensador que tem a função de resfriar o vapor até o estado líquido (condensação) e enviá-lo a caldeira novamente para a geração. Uma vez que o vapor queimado vá para a turbina ele será expelido para a atmosfera através da chaminé, caracterizando um processo de termogeração de ciclo aberto e não fechado (ciclo regenerativo) como é demonstrado na figura 28. Desta maneira pouparemos dinheiro na compra, instalação e manutenção de mais um equipamento instalado no processo.

Uma PCT (Pequena Central Térmica) pode funcionar em regime de operação contínua, ou seja, 24 horas por dia e 8.500 horas por ano, com fator de carga de até 90%, devido à necessidade de paradas para manutenções periódicas dos equipamentos.

3.3 Aspectos para dimensionamento

Para dimensionar corretamente o grupo turbina-gerador aplicado no estudo são fundamentais que os aspectos de instalação sejam calculados corretamente. Abaixo estão as principais especificações para este dimensionamento (WEG, 2013):

- potência nominal (kVA);
- tipo de refrigeração;
- rotação;
- fator de potência;
- tensão nominal;
- número de fases;
- frequência de operação;
- tipo de excitação;
- temperatura ambiente;
- altitude;
- tipo de aplicação;
- máquina acionante.

Em nosso estudo, quem definirá qual a potência nominal que poderá ser entregue ao gerador da PCT é a máquina acionante, que será a turbina a vapor ou a turbina de topo. No caso da turbina a vapor é necessária a informação da pressão do vapor d'água para girar a turbina, proveniente da queima do gás natural e solvente do incinerador. No caso da turbina de topo, é necessário saber a pressão de topo proveniente dos gases queimados.

A rotação do turbogerador depende do número de polos da máquina e da frequência de operação, cálculo descrito na equação 7. Os usuais no mercado e indicados para a aplicação nacional são os de 1800 rpm e 3600 rpm, por consequência da frequência ser de 60 Hz.

O tipo de excitação é usualmente feito com gerador *brushless* PMG, isto é, gerador com excitatriz auxiliar.

A excitatriz auxiliar ou PMG (*Permanent Magnet Generator*) é um pequeno gerador incorporado aos turbogeradores *brushless* com a função de alimentar o circuito de potência do

regulador de tensão. O rotor da PMG, instalado no eixo do turbogerador, é constituído por um pacote de chapas onde são alojados os ímãs permanentes. O estator da PMG é montado normalmente na carcaça do compartimento externo onde também é instalado o estator da excitatriz principal. É um gerador trifásico com rotor constituído de ímãs, que são seus polos de excitação, acoplado ao eixo da máquina principal. O estator, constituído de chapas, possui um enrolamento trifásico para alimentação do regulador de tensão. A excitatriz auxiliar é oferecida como opcional ou não, conforme o projeto, e dependendo da forma construtiva da máquina pode ser fixada na tampa ou na base do gerador no exterior da máquina, no lado não acionado. Pode ser conectado diretamente ao regulador de tensão ou através de bornes na caixa de ligação da excitatriz auxiliar (WEG, 2013).

No caso de excitação *brushless* sem excitatriz auxiliar (PMG) o circuito de potência do regulador de tensão é alimentado através do transformador de excitação conectado aos terminais principais do turbogerador. O transformador de excitação pode ser instalado na caixa de ligação do turbogerador ou no painel de excitação.

Ambas as tecnologias são completamente conhecidas, pois estes princípios são utilizados pelas usinas de açúcar e álcool na autoprodução e cogeração de energia elétrica.

Para gerar energia elétrica através do vapor é necessário ter energia disponível neste vapor. Para isso é preciso ter vapor com pressão, uma temperatura de pelo menos 50°C acima da temperatura de saturação do fluido utilizado e vazão suficiente para movimentar as pás da turbina.

3.4 Queimador

O queimador, ou incinerador de gases, é o processo responsável pela queima dos gases tóxicos, contaminados com solvente, provenientes das tintas aplicadas nas superfícies dos carros. Ao receber a aplicação de tinta, os carros passam por um processo de secagem feito pelas estufas. Estas por sua vez, trabalham a uma temperatura média de 150°C e fazem com que o solvente existente na tinta entre em ebulição. Junto às estufas, existe um grupo de extratores que

são os responsáveis por retirar os gases tóxicos das estufas e enviá-los até o queimador para receber o devido tratamento.

O interior dos fornos do queimador é preenchido por pequenas conchas refratárias, que tem a principal função de manter a alta temperatura no processo. Estas conchas também funcionam como barreiras, pois dificultam a passagem das partículas que acompanham os COV's (compostos orgânicos voláteis) queimados, fazendo com que eles se depositem no fundo dos fornos e dentre as conchas e, assim, é liberado somente o gás puro queimado, ou seja, o vapor para a atmosfera.

Este processo se deve à necessidade de liberação para o funcionamento do setor, normas estipuladas pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP), que não permite que estas substâncias tóxicas sejam lançadas ao ar.

Logo, estes gases são queimados e, assim, ao passar pelo processo, liberam uma grande quantidade de vapor puro para a atmosfera, conforme permitido pelo IAP. Ambas as chaminés, como todo o processo, são revestidas por uma grossa camada de lã de rocha, um isolante térmico cuja matéria prima básica é a rocha vulcânica, também chamada de diábase, e aglutinante de resina. A lã de rocha é responsável por manter as temperaturas e fazer com que a temperatura interna não escape para a superfície das chaminés, pois possui uma temperatura de fusão a partir de 1200°C, uma temperatura muito superior à trabalhada no queimador, evitando assim acidentes durante vistorias e manutenções.

A seguir as imagens 29 e 30 mostram o queimador, detalhando a chaminé de entrada para o processo com os gases tóxicos e a chaminé que libera o vapor para a atmosfera e o conjunto de fornos que fazem o processo.



Figura 29: chaminés de entrada e saída do queimador
Fonte: autoria própria



Figura 30: queimador
Fonte: autoria própria

O combustível principal utilizado nesta queima é o gás natural, mas sendo o solvente também inflamável, atua como um combustível secundário para alimentar a chama do forno.

O funcionamento do conjunto de queimadores é acompanhado através de um software, conhecido como “Supervisório”, que é responsável por mostrar todo o processo da queima dos gases tóxicos assim como a temperatura e demais valores de todo o procedimento de combustão e se necessário modificar o funcionamento do processo. A tela do mesmo é exibida na imagem 31, a seguir.

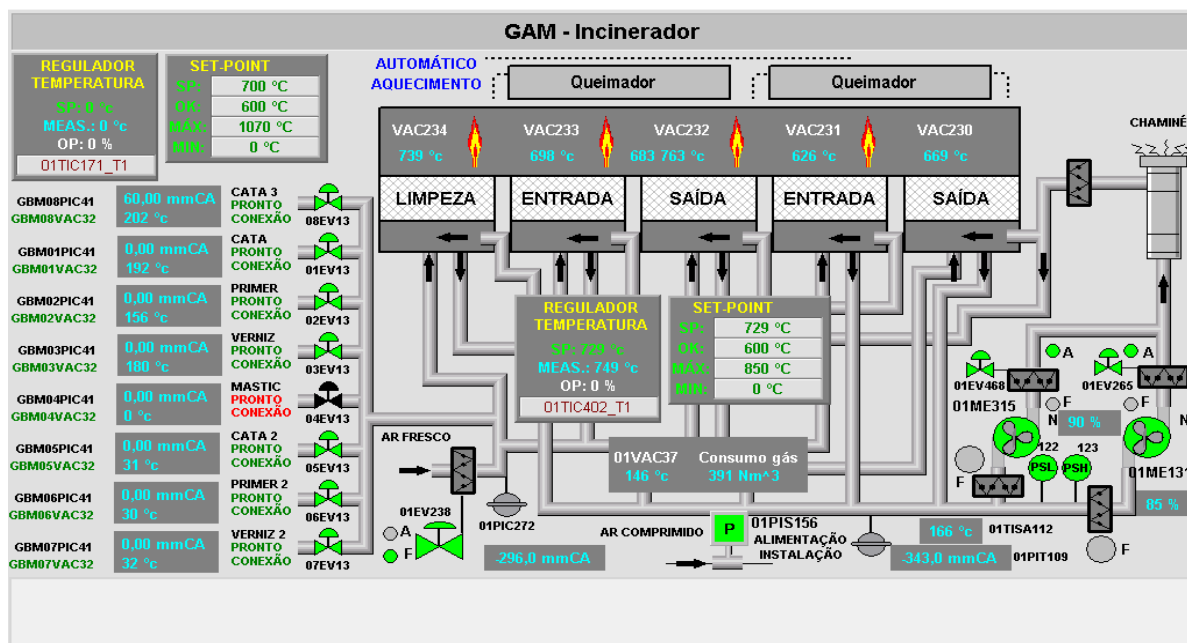


Figura 31: tela do Supervisório
Fonte: autoria própria

O processo de queima se dá através de cinco ciclos, onde:

- 2 ciclos são de entrada de gás tóxico;
- 2 ciclos são de saída de gás queimado;
- 1 ciclo de limpeza.

Estes ciclos se alteram aleatoriamente a cada 30 segundos, pois todos os fornos devem passar pelo processo de limpeza, que consiste na circulação de ar dentro do forno. Uma vez que estas chamas são programadas para manter a temperatura entre 600°C e 800°C, o vapor produzido também fica nesta faixa de temperatura, mas é misturado com ar fresco e resfriado por ventiladores e atinge a temperatura média de 165°C e, assim, pode ser liberado à atmosfera, respeitando as normas exigidas pelo IAP.

Como citado anteriormente, o queimador será o equipamento responsável por substituir a caldeira no processo de termogeração, e para existir a possibilidade de produzir eletricidade através da energia térmica é necessário vapor à alta pressão e à alta temperatura, sendo esta obrigada a ter um valor de no mínimo 50°C acima do ponto de saturação do fluido. Estando Curitiba situada a uma altitude de 934 m acima do nível do mar, o vapor de água satura a uma temperatura pouco abaixo dos 100°C a 1 atm, conforme CNTP. Como no processo temos a

produção de vapor a até 800°C é possível elevar a temperatura de saída da chaminé apenas deixando de resfriá-la até os 165°C como é feito atualmente.

3.5 Início do dimensionamento

Para análise da viabilidade do sistema, em tese no trabalho, foi preciso dimensionar e calcular algumas variáveis referentes à turbina e ao gerador, principalmente, a potência fornecida.

Essa potência é relacionada, claro, com a potência instalada de iluminação do departamento de pintura da automotiva. Por isso, foi necessário encontrar um gerador e uma turbina que atendam a essas expectativas, a demanda da potência instalada da iluminação.

O vapor de saída do incinerador é que vai ser utilizado para acionar a turbina, que se encontra diretamente conectada ao gerador. Esse vapor tem que ser suficiente a ponto de mover/girar essa turbina e conseguir dar a ela alimentação necessária para o seu devido funcionamento.

3.5.1 Vapor de saída do incinerador

Para encontrarmos uma turbina no mercado que atendesse as necessidades da nossa instalação, precisamos não apenas da demanda a ser suprida da potência instalada, mas também as características do vapor que disponhamos na instalação. Sua vazão, pressão e temperatura são fatores importantes a serem coletados, os quais necessitam ter um valor mínimo para poder girar uma turbina, por mais pequena que ela seja. Portanto, foi preciso fazer medições do vapor para coleta desses dados.

No departamento, já citado, da automotiva, essas medições são feitas regularmente para que relatórios sejam gerados para o IAP, que através da resolução SEMA (Secretaria do Meio

Ambiente) 041 de 2002 estabelece critérios para o auto monitoramento das emissões atmosféricas respeitando os padrões estabelecidos pela resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n° 03-90, que define como poluente toda e qualquer matéria ou energia com intensidade, tempo, temperatura, quantidade ou concentração que esteja em desacordo e possa tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde.

Este procedimento tem por finalidade controlar a emissão de COV's que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas com o ar.

Utilizamos, para captar dados, as medições que já fazem parte do plano de monitoramento de emissão de COV's da equipe de manutenção. Foram realizadas três medições em dias e horários diferentes para que fossem contempladas situações de variação no volume de produção, e como os resultados não apresentaram variações significativas, ficando abaixo dos 0,5% de diferença, percebemos que independentemente do ritmo de trabalho da fábrica, os parâmetros importantes para o dimensionamento da turbina se mantiveram estáveis, mostrando que se pode conseguir estabilidade na operação do gerador.

O equipamento utilizado foi um MEDIDOR MULTIFUNÇÃO TESTO modelo "TESTO 400", demonstrado na figura 32, que possibilita efetuar medições de temperatura, CO₂, velocidade (rpm), corrente elétrica, tensão elétrica, umidade relativa, pressão, velocidade do ar e volume de ar deslocado. O equipamento, demonstrado na figura abaixo, segue o programa de calibração estabelecido pela empresa e sua acuracidade é garantida pelo departamento de Garantia da Qualidade, responsável pela auditoria de processo, conforme identificação em etiqueta própria para isto.



Figura 32: medidor multifunção TESTO 400
Fonte: autoria própria

Composto de inúmeras pontas de prova intercambiáveis que, acopladas ao aparelho, determinam a função de medição desejada, permitindo que com apenas um aparelho sejam coletadas todas as informações necessárias, que serão interpretadas posteriormente para estabelecer a conclusão deste trabalho. Como a pressão é uma das principais variáveis para dimensionamento, a seguir são mostrados os dispositivos necessários para esta coleta de dados.

O transdutor abaixo na figura 33 é acoplado ao tubo de Pitot da figura 34:



Figura 33: transdutor
Fonte: autoria própria



Figura 34: tubo de Pitot
Fonte: autoria própria

Podemos então estabelecer a pressão e vazão do vapor que escoa pela chaminé através da inserção do tubo de Pitot em local previamente preparado para coleta de dados, como demonstrado nas figuras 35, 36 e 37:



Figura 35: medição de vazão e pressão do vapor
Fonte: autoria própria

Para a coleta de temperatura é utilizado o termômetro acoplado ao aparelho TESTO 400, como mostrado nas figuras seguintes:

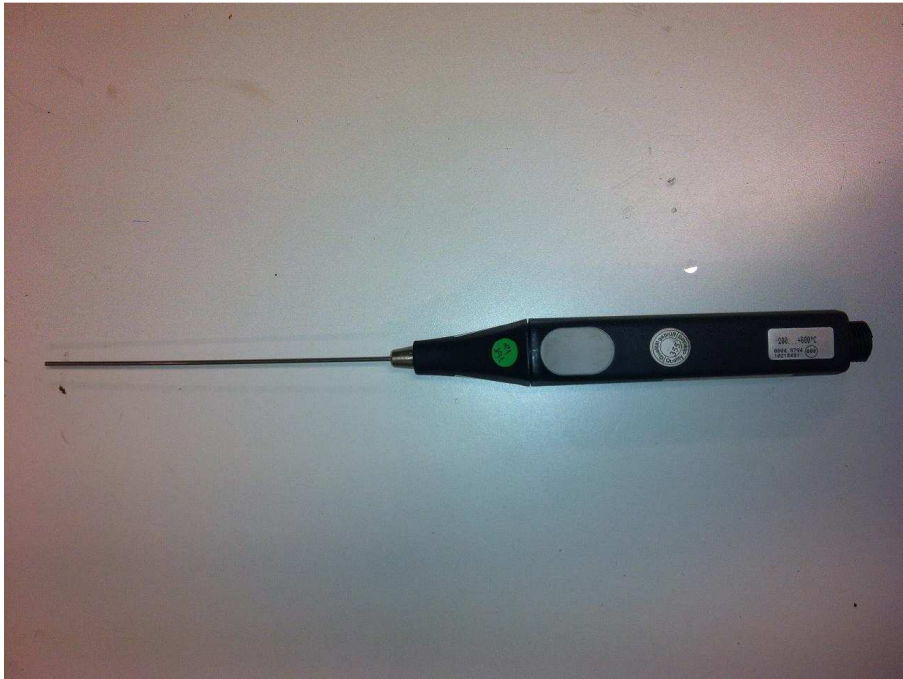


Figura 36: termômetro
Fonte: autoria própria



Figura 37: medição de temperatura do vapor
Fonte: autoria própria

Os resultados obtidos nas medições de vazão, velocidade e temperatura são apresentados na tabela abaixo:

MEDIÇÕES CHAMINÉ			
	Medição 1	Medição 2	Medição 3
Pressão de saída (bar)	0,0345	0,0346	0,0344
Vazão de saída (m³/h)	112.245	112.240	112.242
Temperatura (°C)	165	162	170

Tabela 1: medições de saída da chaminé
Fonte: autoria própria

Podemos perceber a estabilidade dos valores medidos nas três oportunidades, em dias diferentes como já citado, mostrando que a fonte de energia é estável. Os valores considerados foram os valores médios. Esses valores podem ser transformados em unidades compatíveis com as especificações da turbina:

Como 1 mca = 0,098 bar, temos:

- Pressão de saída considerada: 345 mmca = 0,345 mca = 0,03381 bar.

Como 1 m³/h = 1.000 Kg/h, temos:

- Vazão de saída considerada: 112.242 m³/h = 112.242 x 10³ Kg/h;
- Temperatura considerada: 165°C.

Os resultados obtidos das medições foram apresentados ao fornecedor de turbinas, que pôde oferecer a turbina mais apropriada para a nossa instalação e que atenda as necessidades de geração de energia elétrica.

4. DIMENSIONAMENTO

4.1 Turbina

A turbina dimensionada e encontrada, demonstrada na figura 38, que poderia adequar-se ao nosso estudo foi da empresa TGM Turbinas, a menor disponível no mercado atualmente, utilizada em micro centrais termelétricas. Uma micro turbina a vapor modelo TG320 projetada para acionar pequenos geradores de energia elétrica e instaladas tanto em geração isolada quanto em paralelo com a rede elétrica. Essas turbinas são ideais para o aproveitamento de pequenas vazões, baixas pressões de vapor e baixas temperaturas, mesmo na condição saturado, proveniente de caldeiras de biomassa, óleo, gás, resíduos e outros.

Suas especificações são as seguintes:

- Potência: 300 kW;
- Rotação rpm: 10.000/1.800;
- Condição de vapor: 22 bar; 320°C; 6 bar;
- Preço de mercado: R\$ 350.000,00.

Esses dados significam que a turbina irá requerer uma temperatura de 320°C do vapor e terá uma velocidade de 10.000 rpm, exigindo 22 bar para o seu funcionamento à potência máxima de 300 kW. Na saída dessa turbina a velocidade é de 1.800 rpm e a pressão de 6 bar, que será transmitida ao gerador.

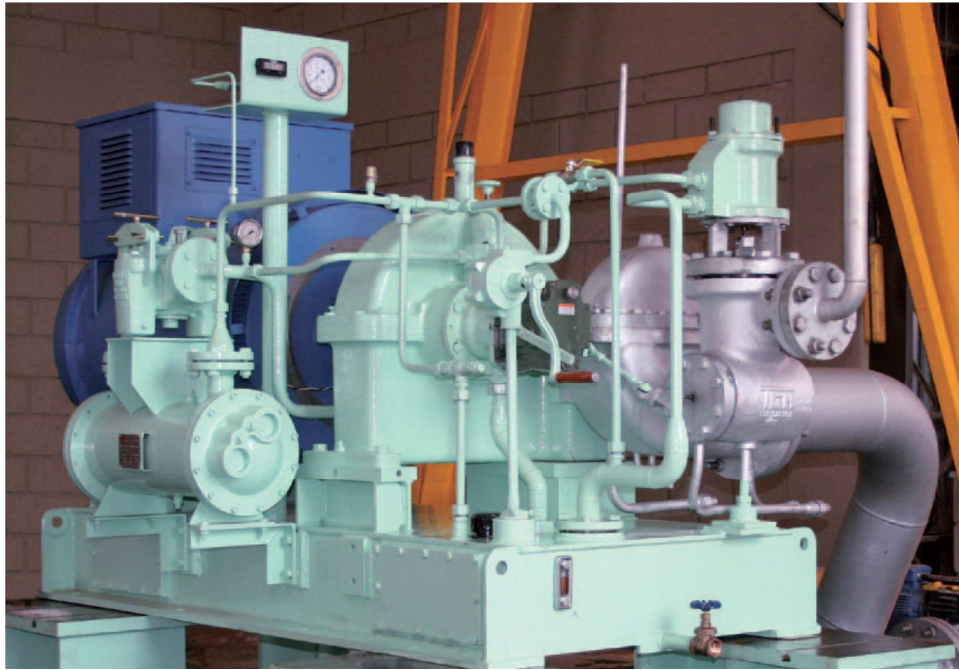


Figura 38: turbina TG320
Fonte: catálogo TGM Turbinas

4.2 Problemas encontrados ao longo do estudo

Diante das especificações da turbina, nos deparamos com um primeiro problema: a pressão do vapor que a turbina necessita. A pressão que dispomos do incinerador é muito baixa para acionar a turbina, que exige a média de 22 bar de pressão.

Com isso, foi necessário pensar em outro modo de termos essa pressão exigida, aproveitando, é claro, o próprio vapor do incinerador. Uma caldeira, instalada entre a saída do incinerador e a turbina, seria uma das possibilidades de conseguirmos um vapor a alta pressão. Porém, mesmo utilizando nosso vapor (de baixa pressão), teríamos que alimentar a caldeira com algum tipo de combustível, como: gás natural, lenha, entre outros, implicando em um aumento significativo nos custos finais, e isso, fugiria do objetivo do nosso trabalho, o aproveitamento de energia do vapor sem custos extras. Estaríamos aproveitando o nosso vapor, porém, este seria

insignificante diante do combustível que ainda iríamos utilizar na caldeira. Informações técnicas sobre a caldeira estão descritas no item 4.3.

Chegou a ser cogitada a possibilidade de afinilar a tubulação de saída da chaminé com o intuito de obter uma maior pressão de vapor. Porém, através do princípio de Venturi e Bernoulli, concluímos que o afinilamento causa o aumento apenas da velocidade e não da pressão do fluido.

Outra questão que foi levantada é referente à temperatura de operação da turbina, a qual é maior que a da saída do incinerador. Porém, como já foi descrito anteriormente no item 3.4, essa temperatura coletada na saída da chaminé pode facilmente ser aumentada, já que ela sofre processo de resfriamento para ser liberada à atmosfera, conforme as normas do IAP. Essa temperatura, antes do resfriamento, atinge entre 600 e 800°C e, depois do resfriamento, é reduzida ao valor de 165°C, como citado. O resfriamento é feito por uma válvula que injeta ar fresco no sistema, essa válvula controla a quantidade de ar fresco inserido no processo. Por isso, a temperatura pode ser controlada, conforme é requisitada pela turbina, diminuindo a injeção de ar fresco.

4.3 Caldeira

Uma caldeira industrial é um enorme tanque fechado onde o líquido é aquecido, formando um fluido vaporizado que serve em vários processos ou aplicações de aquecimento. O vaso de pressão em uma caldeira é normalmente feito de aço ou ferro fundido e a fonte de calor para uma caldeira é a combustão de qualquer um dos vários combustíveis, como madeira, carvão, petróleo ou gás natural (CALDEIRA INDUSTRIAL, 2013).

A maioria dos modelos de caldeiras industriais produz vapor para ser usado em temperatura de saturação, isto é, o vapor saturado. As caldeiras de vapor superaquecido vaporizam a água e o próprio calor do vapor em um dispositivo superaquecedor. Isso fornece vapor em uma temperatura muito mais elevada, mas pode diminuir a eficiência térmica global da

planta de geração de vapor, por que a temperatura mais elevada do vapor exige uma temperatura de exaustão maior do gás de combustão (CALDEIRA INDUSTRIAL, 2013).

Como visto anteriormente, não foi possível aproveitarmos o nosso vapor de saída do incinerador diretamente na turbina, pois o mesmo apresenta pressão insuficiente para girá-la. Com isso, surgiu a ideia de instalarmos uma caldeira na instalação, na qual iria se utilizar do nosso vapor e combustível injetado. Porém, essa injeção de combustível já não cumpriria os nossos objetivos de trabalho, que é aproveitarmos o vapor do incinerador sem gastar nenhum combustível a mais no processo. No entanto, ainda assim, foi estudada essa ideia da caldeira, que teria a função de gerar o vapor a uma pressão, vazão e temperatura suficientes para a turbina. Foram pesquisadas algumas caldeiras no mercado que poderiam satisfazer as nossas instalações e, principalmente, a turbina. Através do fornecedor “Termovapor”, a caldeira que se enquadraria na instalação é a de modelo flamotubular “Misson 3-Pass 8.0” da marca “Alfa Laval Aalborg”. Uma caldeira projetada de acordo com a norma ASME e que possui as seguintes características:

- Combustível utilizado: óleo e gás;
- Traseira úmida (*wet back*) com três passagens de gases;
- Rendimento: 91%;
- Capacidade de vapor: 2 – 34 t/h;
- Capacidade de água quente: 1,5 – 25 MW;
- Pressão: até 300 psig;
- Temperatura: Vapor saturado e superaquecido;
- Capacidade: 8.000 Kg/h;
- Peso vazia: 21,0 t;
- Peso em operação: 35,3 t;
- Valor: R\$ 190.000,00.



Figura 39: caldeira Alfa Laval Aalborg
Fonte: Aalborg Industries, 2013.

4.4 Gerador

O gerador é o equipamento que se utiliza da potência fornecida pela turbina para gerar a energia elétrica. Ambos, turbina e gerador, são acoplados um ao outro, para então trabalharem juntos na instalação. O gerador foi orçado pela empresa WEG, que ofertou um gerador de acordo com a nossa potência instalada de iluminação do departamento e conforme os dados da turbina, já citada. O gerador de mercado ofertado é o modelo GTA311, um gerador trifásico, tipo industrial (fechado), sistema de excitação “*Brushless*” (sem escovas), carcaça de chapas de aço, eixo de aço, isolamento classe "F" (155°C), fabricado conforme prescrições das normas ABNT, IEC e VDE, com as seguintes características:

- Modelo: GTA311;
- Carcaça: 311;
- Potência: 375 kVA;
- Tensão nominal: 0,38 kV;
- Polaridade/Rotação: 04 / 1800 rpm;

- Frequência: 60 Hz;
- Regime de serviço: S1;
- Fator de potência: 0,8;
- Excitação: *Brushless* com bobina auxiliar;
- Classe de isolamento: H;
- Elevação de temperatura: Classe H (125°C);
- Fator de serviço: 1;
- Temperatura ambiente / Altitude: 40°C a 1000 m;
- Forma construtiva: B3T;
- Grau de proteção: IP54;
- Refrigeração: Autoventilado (IC01);
- Montagem: Horizontal;
- Sentido de Rotação: Horário;
- Mancal: Rolamento;
- Aplicação do produto: Industrial;
- Preço: R\$ 167.540,00.



Figura 40: gerador WEG GTA311
Fonte: catálogo WEG

4.5 Aprovação de investimentos

No capítulo onde foi tratada a viabilidade econômica do projeto, comentou-se que o principal critério de aprovação de um projeto é o *payback*, ou seja o tempo de retorno do investimento.

Após levantamento de investimentos necessários para que sejam efetuadas todas as instalações que permitiriam tecnicamente a implantação do projeto, chegamos ao valor abaixo: desconsiderando custos com mão-de-obra, instalação, quadros de controle e comando, cabeamento e equipamentos necessários para o funcionamento do conjunto, ou seja, considerando apenas os equipamentos principais, chegamos ao valor mínimo necessário para a termogeração:

INVESTIMENTOS	
	Valor
Turbina	R\$ 350.000,00
Gerador	R\$ 167.540,00
Caldeira	R\$ 190.000,00
TOTAL	R\$ 707.540,00

Tabela 2: custo da instalação

Fonte: autoria própria

No cálculo desta tabela foram considerados apenas os equipamentos principais para a termogeração. Foram desconsiderados os custos com mão-de-obra, manutenção, instalação, quadros de controle e comando, cabeamento e demais equipamentos necessários para o funcionamento do conjunto, assim como também foi desconsiderado o consumo mensal do combustível (gás natural ou óleo) utilizado para alimentar a caldeira.

Posteriormente foi feita a análise do resumo de consumo do mês de junho de 2013 do setor da pintura, e assim, temos as seguintes condições:

- 1) O departamento tem um consumo de energia elétrica de 2.704,19 MWh;
- 2) O consumo da iluminação 2,9 MWh que corresponde a 0,11% do total do departamento;
- 3) O valor do consumo faturado do departamento: R\$ 438.059,34 reais;
- 4) O valor do consumo de energia elétrica com iluminação do departamento é de R\$ 481,00 reais;

5) O total dos investimentos necessários para instalação ultrapassa um montante de R\$ 700.000,00.

Como já demonstrado a empresa trabalha com o *payback* mínimo de 1 ano:

$$\textit{payback} = \frac{R\$ 700.000,00}{R\$ 481,00} \quad (13)$$

O resultado da equação é de 121 anos para retorno do investimento, sendo então totalmente inviável no aspecto econômico.

Este resultado foi influenciado fortemente pelo fato de que o menor conjunto gerador disponível no mercado é de 300 kW gerando 216 MWh/mês que tem pelo menos 70 vezes mais energia que o necessário para alimentar a carga de iluminação do departamento em questão.

Uma das possíveis ações para trazeremos a instalação para uma condição mais real seria o aproveitamento total da potência do gerador ampliando a diversidade de cargas alimentadas pelo conjunto, aproveitando assim os 216 MWh disponíveis.

Esta energia corresponde a 7,9% da energia mensal consumida, melhorando a relação financeira da instalação, o valor de 7,9% é de R\$ 34.606,00 reais. Transportando este valor para a equação do *payback*:

$$\textit{payback} = \frac{R\$ 700.000,00}{R\$34.606,00} \quad (14)$$

Agora temos um resultado de 20 meses, ou seja ainda maior que um ano que é o mínimo exigido para prosseguimento do estudo.

Algumas considerações devem ainda ser feitas, pois se faz necessário um estudo mais aprofundado da viabilidade, em termos de confiabilidade, de se alimentar outros tipos de cargas através do gerador, uma vez que o sistema produtivo exige que a fonte seja robusta, o que pode aumentar significativamente o valor do investimento, pois seria necessária a implantação de um sistema redundante com a concessionária de energia para garantir a alimentação.

Outro aspecto ainda a ser considerado é o consumo de gás natural para alimentar a caldeira, caso fosse esta instalada o que elevaria os custos fixos da instalação.

Como já não temos condição mínima necessária no *payback* não se faz necessário o cálculo do Índice de Profiabilidade (IP) que é o segundo item a ser considerado no investimento.

5. CONCLUSÕES FINAIS

As grandes invenções que mudaram o rumo da humanidade surgiram de ideias que não faziam o menor sentido em um primeiro momento, ou por acidentes derivados de experimentos que buscavam resolver outros problemas, porém podemos perceber que todas têm em comum a necessidade de facilitarmos a execução de tarefas e mais recentemente de aproveitar de maneira mais eficaz o potencial energético das fontes de energia para garantirmos que as próximas gerações tenham sua sobrevivência garantida.

Quando iniciamos o estudo sobre o aproveitamento da energia disponível na queima dos gases tóxicos no incinerador do prédio da pintura, desejávamos pôr em prática nossos conhecimentos teóricos tendo o objetivo de gerar eletricidade contribuindo, assim, para a redução de custos e colaborar com a preservação do meio ambiente.

Para isto estabelecemos dois parâmetros de decisão, o aspecto técnico e o financeiro, que tem cada um deles um peso na decisão.

Segundo medições, vemos que não há disponibilidade de pressão suficiente para a instalação do termogerador na chaminé de escape dos gases do incinerador, sendo necessária a instalação de uma caldeira complementar, o que encarece significativamente o projeto, foge do conceito de cogeração, pois teríamos altos custos com o combustível que a alimentaria, e desvia o objetivo final do estudo.

Como o resultado do *payback* na situação inicial é de 121 anos, o projeto torna-se economicamente totalmente inviável. Mostramos que podemos trazer este retorno para 20 meses se aproveitarmos a capacidade total de geração do termogerador especificado, uma vez que este é o menor do mercado.

Chegamos enfim à situação que não há viabilidade técnica e nem econômica para prosseguimento das instalações, porém algumas alternativas podem ser consideradas e que sugerimos como prosseguimento de estudos:

- 1) Instalação de um sistema de geração eólica uma vez que a vazão é constante;
- 2) Desenvolvimento de um gerador com potência menor para adequar custos;

3) Desenvolvimento de uma turbina de menor pressão de vapor e menor potência para ser aplicada nestes casos.

Apesar de este estudo ter sido concebido para a indústria automobilística, vemos como plenamente viável seu aproveitamento em outros seguimentos que tenham vapor como subproduto em seus processos, tais como sucroalcooleiras e madeireiras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aalborg Industries. **Caldeira MISSION 3-PASS 8.0**. Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br/general.php?ix=93>>. Acesso em: agosto 2013.

ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO Antonio. **Física Volume Único**. 2 ed. São Paulo, 2011.

ANEEL, **Qualidade do Serviço das Distribuidoras de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/areaPerfil.cfm?idPerfil=7>>. Acesso em março de 2013.

BARJA, Gabriel de Jesus Azevedo. **A cogeração e sua Inserção ao Sistema Elétrico**. Tese (Dissertação de Mestrado) – Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BRASIL ESCOLA, **Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.brasilescola.com/fisica/energia-eletrica.htm>>. Acesso em março de 2013.

BRASIL, Newton Paterman. **Notas de aula de Co-geração do Curso de Engenharia de Equipamentos**. Agosto de 2005 (Texto digitado).

CALDEIRA INDUSTRIAL. Disponível em: <<http://www.caldeiraindustrial.com.br>>. Acesso em: agosto de 2013.

CCEE. **Tipos e Fontes de Energia**. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes;portal=GK1dRp4GmCKVdj5yp1zdyTGpGdP2JhT6mF8V0D88JjGndYnprwQf!-92284699!1325190862?_afWindowId=null&_afLoop=22685732564000&_afWindowMode=0&_adf.ctrl-state=592resnkf_4#%40%3F_afWindowId%3Dnull%26_afLoop%3D22685732564000%26_afWindowMode%3D0%26_adf.ctrl-state%3Dnhhao3ba3_4>. Acesso em: abril de 2013.

CLEMENTINO, Luíz Donizeti. **A conservação de energia por meio da co-geração de energia elétrica**. São Paulo: Érica, 2001.

COELHO, Suani Teixeira. **Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a partir de Biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo**. Tese – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CONAB. **A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil.** Análise de Desempenho da Safra 2009-2010, publicação em 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf>. Acesso em: agosto de 2013.

CPN/SP. **Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Distribuição.** Disponível em: <http://www.fundacentro.gov.br/dominios/ctn/anexos/cdNr10/Manuais/M%C3%B3dulo01/333_1-%20INTRODU%C3%87%C3%83O%20A%20SEGURAN%C3%87A%20COM%20ELETRICIDADE.pdf>. Acesso em: abril de 2013.

DOS REIS, Lineu Belico. **Geração de Energia Elétrica.** 3 ed. Barueri, 2003.

ELETROBRÁS, **Eficiência Energética no Uso do Vapor.** Disponível em: <<http://www.pessoal.utfpr.edu.br/jmario/arquivos/Livro%20Vapor.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2013.

HIRSCH, Saul. **Turbinas a Vapor.** Apostila de Fontes Alternativas de Energia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Índice de Custo Benefício (ICB) de Empreendimentos de Geração Termelétrica – **Metodologia de Cálculo.** Rio de Janeiro, RJ. Empresa de Pesquisa Energética, 2011.

KNOLLSEISEN, Cristian; DA CUNHA DINIZ, Hugo C. **Desenvolvimento de um Simulador para Cálculo de Geração de Energia Elétrica por Meio de Turbinas a Vapor.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MARMONTEL, Camila F. F; SILVA, Joyce M; OLIVEIRA Lisandra L; POLIONI, Marcelo C. **Turbina a Vapor.** Disponível em <<http://www.webartigos.com/artigos/turbina-a-vapor/57271/>>. Acesso em: fevereiro de 2013.

MARQUES, Iomar N. **Termodinâmica Técnica.** 4 ed. Rio de Janeiro, 1965.

MARTINELLI, Luiz Carlos. **Introdução às Máquinas Térmicas (Turbinas a Vapor e a Gás).** Disponível em <<http://www.webartigos.com/artigos/turbina-a-vapor/57271/>> Acesso em: fevereiro de 2013.

MILEAF, Harry. **Eletricidade.** São Paulo, 1985.

QUINTANILHA, Lilian; **O universo das emissões atmosféricas e a atuação do setor industrial.** Revista Meio Ambiente Industrial Julho/Agosto 2009.

Relatório de Sustentabilidade 2009. Rio de Janeiro, RJ. Petrobras, 2009.

SERWAY, Reymond A.; JEWETT, John W. **Princípios da Física Vol. 1.** 3 ed. São Paulo, 2007.

SILVA LORA, Electo Eduardo; NASCIMENTO, Marco Antonio Rosa. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projetos e Operação.** Editora Interciência, 2004.

SILVEIRA, José Luz. **Cogeração.** Unesp, São Paulo, 2009.

SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Clauss; WYLEN, Gordon J.V. **Fundamentos da Termodinâmica.** 5 ed. São Paulo, 1988.

SOUZA, Líria Alves de. **Formas de Energia.** Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com.br/quimica/formas-energia.htm>>. Acesso em: março de 2013.

SPERANDIO, Carlos Augusto. **Fundamentos da Engenharia de Segurança.** Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológico do Paraná, Curitiba, 2001.

TERMODINÂMICA, **Torre de Resfriamento.** Disponível em: <<http://myspace.eng.br/fis/termod/termod1A.asp>>. Acesso em fevereiro de 2013.

TIPLER, Paul Allen; MACEDO, Horácio. **Física para cientistas e engenheiros.** 6. ed. Rio de Janeiro, 2008.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Geração de Energia Elétrica no Brasil.** 1 ed. Rio de Janeiro, 2005.

TRAVITZKI, Rodrigo. **Regras para citação e referências – ABNT. 2009.** Disponível em: <http://rizomas.net/cultura-escolar/bases-de-dados/208-regras-para-citacao-e-referencias-abnt.html>. Acesso em: maio 2012.

Turbinas a Vapor 1. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAHEEAF/turbinas-a-vapor-1?part=2>> Acesso em: abril de 2013.

UFPR. **Máquinas Térmicas.** Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-Aula00.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2013.

MAZZA. Ricardo A. **Ciclos.** Apostila de Ciclos. UNICAMP Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~mazza/termo/PPTX/PDF/Cap7Ciclos.pdf>>. Acesso em: abril de 2013.

WEG, **Armazenagem de Máquinas Elétricas Girantes de Médio Porte**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-armazenagem-de-maquinas-eletricas-girantes-de-medio-porte-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: março de 2013.

WEG. **Características e especificações de geradores**. Disponível em: <<http://www.weg.net/files/products/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2013.

WEG, **Turbogeradores**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-turbogeradores-50021177-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: abril de 2013.

WEG, **Turbogeradores – Linha Horizontal**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-turbogerador-10061221-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: abril de 2013.

WOTTRICH, B; **Modelo Para Análise Econômica e Financeira Em Projetos de Geração Distribuída de Energia Com Fontes Alternativas**. 2010. Dissertação de Mestrado(Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria - RS