



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Autarquia Municipal de Regime Especial

Pelo Dec. Fed. n°78.924/76

Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP

CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica

Rua Daniel Danelli s/n° Jardim Morumbi

Taubaté-SP 12060-440

Tel.: (12) 3625-4190

Email: eng.eletrica@unitau.br

Gustavo Mendrot Andrade

Turbogeradores (Turbinas a vapor, a gás), Turbinas Hidráulicas e Turbinas Eólicas.

Taubaté – SP
2018

Gustavo Mendrot Andrade

Turbogeradores (Turbinas a vapor, a gás), Turbinas Hidráulicas e Turbinas Eólicas.

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis.

Taubaté - SP
2018

Ficha Catalográfica

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

A553t Andrade, Gustavo Mendrot
 Turbogeradores (turbinas a vapor, a gás), turbinas hidráulicas e turbinas
 eólicas / Gustavo Mendrot Andrade. -- 2018.
 85 f. : il.

 Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de
 Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.

 Orientação: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis, Departamento de
 Engenharia Elétrica.

 1. Matriz energética. 2. Turbinas. I. Título. II. Graduação em Engenharia
 Elétrica e Eletrônica.

CDD – 621.165

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
Pelo Dec. Fed. n°78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/n° Jardim Morumbi
Taubaté-SP 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
Email: eng.eletrica@unitau.br

Turbogeradores (turbinas a vapor, a gás), turbinas hidráulicas e turbinas eólicas.

Gustavo Mendrot Andrade

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

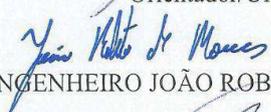
Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS

Orientador/UNITAU-DEE


ENGENHEIRO JOÃO ROBERTO DE MORAES

Coorientador /UNITAU-DEE


PROF. DR. RUBENS CASTILHO JÚNIOR

UNITAU-DEE

2018

RESUMO

O trabalho de pesquisa aborda os principais conceitos gerais e operacionais sobre turbinas a vapor, a gás, eólicas e hidráulicas. Com enfoque nas aplicações destas turbinas em instalações geradoras de eletricidade, demonstrando suas classificações, características básicas de funcionamento das mesmas e equações relevantes para a utilização. Tendo como objetivo o enfoque da importância destas máquinas no atendimento da matriz energética, pela utilização em grande parte de instalações, enumerando as vantagens e desvantagens das turbinas e das construções que podem abrigar estas. Contudo aborda-se a geração a partir dessas máquinas e da sua relevância nos dias atuais, principalmente de algumas em específico por causa da mudança ocorrente na matriz energética mundial.

PALAVRAS-CHAVE: Turbinas. Matriz Energética.

ABSTRACT

The research paper addresses the main general and operational concepts of steam, gas, wind and hydraulic turbines. Focusing on the applications of these turbines in electricity generating facilities, demonstrating their classifications, basic characteristics of their operation and relevant equations for their use. Aiming to focus on the importance of these machines in the service of the energy matrix, for the use in large part of installations, enumerating the advantages and disadvantages of the turbines and the constructions that can house them. However, the generation from these machines and their relevance in the present day, mainly of some in particular, because of the change in the world energy matrix.

KEYWORDS: Turbines. Energy matrix.

LISTA DE SÍMBOLOS

η_{hp}	eficiência das turbinas de alta pressão
D_{hrhp}	diferença real de entalpia
D_{hihp}	diferença de entalpia isotrópica
H_{vap}	entalpia do vapor superaquecido admitido pela turbina de alta pressão
H_{erth}	entalpia do vapor superaquecido na saída
H_{ith}	entalpia final do vapor superaquecido para expansão isotrópica da admissão até a saída
W_i	potência interna útil (w)
W_o	potência teórica possível (w)
W_e	potência efetiva no eixo (w)
η_m	rendimento mecânico
η_{ri}	rendimento interno
P	potência de uma turbina a vapor
m_s	fluxo de massa de vapor
Δh	diferença de entalpia entre entrada e saída
ΔE	variação da energia do sistema
ΔU	variação da energia interna do sistema
ΔE_c	variação da energia cinética
ΔE_p	variação da energia potencial
Q_{entra}	calor fornecido
Q_{sai}	calor rejeitado
h_1	entalpia do ar ambiente (KJ/Kg*K)
h_2	entalpia do final da compressão (KJ/Kg*K)
h_3	entalpia da temperatura de combustão (KJ/Kg*K)
h_4	entalpia do final da expansão (KJ/Kg*K)
c_p	calor específico á pressão constante (KJ/Kg*K)
T_1	temperatura do ar ambiente (K)
T_2	temperatura do final da compressão (K)
T_3	temperatura da combustão (K)
T_4	temperatura do final da expansão (K)
W_t	trabalho da turbina
\dot{m}_a	vazão mássica do ar (Kg/s)
W_c	trabalho do compressor
W_{liq}	trabalho líquido produzido
η_t	rendimento térmico do ciclo (%)
R_p	razão de compressão
$\eta_{compressor}$	rendimento isentrópico do compressor (%)
$\eta_{turbina}$	rendimento isentrópico da turbina (%)
T	torque de uma turbina eólica (N*m/rad)
P	potência mecânica (W)
ω_t	velocidade angular tangencial (rad/s)
C_t	coeficiente de torque
C_p	coeficiente de potência
λ	razão de velocidade de ponta de uma pá
u	velocidade tangencial
v	velocidade incidente dos ventos
D	diâmetro externo da turbina
ω_r	velocidade angular do rotor

$P=P_{ext}$	potência extraída de uma turbina eólica
v	velocidade
v_l	velocidade média dos ventos (m/s)
ρ	densidade do ar seco=1,225 (Kg/m ³)
α	ângulo de atuação
F_s	força de sustentação
F_a	força de arrasto
C_s	coeficiente de sustentação
C_a	coeficiente de arrasto
T_{frio}	temperatura da fonte fria (K)
T_{quente}	temperatura da fonte quente (K)
e	eficiência de uma turbina eólica (%)
P_t	potência extraída pela turbina
P_v	potência disponível do vento
P_t	potência teórica da turbina
Δm	gradiente de deslocamento de massa
Δt	gradiente de tempo
Q	vazão
H_{top}	queda
η_t	rendimento da turbina
η_h	rendimento do circuito hidráulico
P_{mec}	potência mecânica no eixo da turbina
γ	peso específico da água=1000*9.81 (N/m ³)
P_{ef}	potência eficaz no eixo da máquina
P_i	potência interna
P_{pm}	potência mecânica perdida
Q_t	vazão na entrada da turbina (m ³ /s)
H_t	queda na entrada da turbina (m)
H	altura de queda/elevação
J_h	altura de perda de pressão
Q_i	vazão perdida
η_m	rendimento mecânico

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
Revisão Bibliográfica.....	13
Motivação.....	14
Objetivo Geral	14
Objetivos Específicos.....	15
Organização do Trabalho	15
1 TURBINAS A VAPOR	15
1.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO	16
1.1.2 Componentes das turbinas a vapor.....	17
1.2 REGULAGEM DAS TURBINAS A VAPOR	19
1.2.1 REGULAGEM DE POTÊNCIA.....	19
1.2.2 Regulagem de velocidade	20
1.2.3 Regulagem de pressão.....	21
1.3 CICLO DE RANKINE	21
1.4 TURBINAS A GÁS	21
1.4.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO	22
1.4.2 Componentes das turbinas a gás	23
1.5 COMBUSTÍVEIS	25
1.6 CICLOS DE OPERAÇÃO.....	26
1.6.1 CICLOS ABERTOS	26
1.6.2 Ciclos Fechados	29
1.7 TURBINA EÓLICAS	31
1.7.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO	31
1.7.2 Componentes das turbinas eólicas	32
1.8 VENTOS.....	34
1.9 AEROGERADORES TECNOLOGIAS	34
1.9.1 AEROGERADORES COM VELOCIDADE CONSTANTE.....	34
1.9.2 Aero geradores com velocidade variável	35
1.10 TURBINAS HIDRÁULICAS.....	36

1.10.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO	37
1.10.2 Estruturas das turbinas hidráulicas.....	37
1.10.3 Componentes das turbinas hidráulicas	39
2 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS	42
2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS A VAPOR	42
2.1.1 QUANTO AO PRÍNCIPIO DE FUNCIONAMENTO	42
2.1.2 Quanto à direção do escoamento.....	43
2.1.3 Quanto á pressão de escape.....	44
2.1.4 Quanto ao número de estágios	45
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS A GÁS	47
2.2.1 DE ACORDO COM AS CONDIÇÕES DE EMPREGO	47
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS	48
2.3.1 ROTORES DE EIXO VERTICAL.....	48
2.3.2 Rotores de eixo horizontal	51
2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS	52
3 EQUACIONAMENTOS	53
3.1 EFICIÊNCIA E RENDIMENTO DAS TURBINAS A VAPOR.....	53
3.1.2 PERDAS NAS TURBINAS A VAPOR.....	54
3.1.3 Potência das turbinas a vapor.....	55
3.2 EQUAÇÕES DAS TURBINAS A GÁS	55
3.2.1 PERDAS NAS TURBINAS A GÁS.....	57
3.3 EQUAÇÕES DAS TURBINAS EÓLICAS	58
3.3.1 TORQUE	58
3.3.2 Forças de arrasto e de sustentação	60
3.3.3 Eficiência energética de uma turbina eólica.....	61
3.3.4 Limite de Betz.....	61
3.3.5 Potência em turbinas eólicas	63
3.4 EQUACIONAMENTOS DAS TURBINAS HIDRÁULICAS	64
3.4.1 POTÊNCIA.....	64
3.4.2 Rendimento das turbinas hidráulicas	65

3.4.3 Perdas das turbinas hidráulicas	66
4 APLICAÇÃO DAS TURBINAS	68
4.1 TURBINAS A VAPOR NAS CENTRAIS A VAPOR.....	68
4.1.1 Central termoelétrica.....	68
4.1.2 Central Nuclear	68
4.1.3 Central Geotérmica	70
4.2 APLICAÇÃO DAS TURBINAS A GÁS	71
4.2.1 TERMOELÉTRICAS	71
4.2.2 Sistema de propulsão marítima a gás (COGOG)	71
4.2.3 Aeronáutica	72
4.2.4 Ciclo combinado	73
4.3 UTILIZAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS.....	74
4.3.1 SISTEMAS EÓLICOS.....	74
4.3.1.1 Sistemas Isolados	74
4.3.1.2 Sistemas Híbridos	75
4.3.1.3 Sistemas interligados a rede	76
4.3.1.3.1 Sistemas offshore	77
4.4 APLICAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS.....	78
4.4.1 HIDROELETRICIDADE	78
5 Conclusões	81
Referências	83

INTRODUÇÃO

Atualmente grande parte da demanda energética mundial é suprida por fontes não renováveis. E a busca por novos meios de geração, mais eficientes e menos poluentes se instaurou. Entretanto equipamentos como as turbinas que convertem energia térmica ou mecânica em eletricidade, com o auxílio de um gerador, podem ser utilizados de maneira coerente e mais eficaz, reduzindo assim problemas como emissão de gases e impactos provenientes das instalações que abrigam estes equipamentos.

As tecnologias de implementação e aplicação destes componentes aumentaram nos últimos anos e tendem a crescer ainda mais. A utilização de turbina a gás para cogeração com as turbinas a vapor operando em ciclo combinado é um exemplo, como também a energia eólica, uma fonte de energia considerada renovável providas dos ventos. Deste modo se faz necessário a conceituação dos conceitos, funcionamentos e componentes, utilização e de como as instalações que abrigam estes equipamentos afetam o ambiente, para poder chegar a conclusão dá mais indicada e menos impactante, para uso na matriz energética.

Ao longo do trabalho se prescreve as definições das turbinas a gás, a vapor, hidráulicas e eólicas, para diferenciação das mesmas, já que as turbinas são máquinas mecânicas que convergem a energia de um fluído em energia elétrica, por meio de seus componentes e equipamentos auxiliares.

Então para a eventual separação das mesmas também é posto no corpo desse trabalho, as classificações destas turbinas, suas variedades, o modo como são aplicadas atualmente e como são de suma importância no modo de como é produzida a energia hoje em dia. Para exemplificação, no mundo as principais fontes de energia provém das hidroelétricas, das centrais nucleares e das centrais termoelétricas que fazem uso dos combustíveis fósseis. E demonstrando os equacionamentos principais destes equipamentos, assim, ao final com todo o conhecimento descrito, a comparação da efetividade e possibilidade de aplicação de cada delas sendo considerada, com o intuito de se chegar na melhor opção de utilização, considerando tudo o que foi conceituado no decorrer do trabalho.

Revisão Bibliográfica

As turbinas são equipamentos mecânicos que realizam a conversão de energia contida nas águas, no vapor, no gás, nos ventos, que se movimentam no interior da turbina ou em seus rotores, convertendo essa energia cinética ou potencial para energia elétrica.

Existe diferenças entre as turbinas, através da diferenciação de acordo com seu funcionamento. A turbina eólica, por exemplo, tira proveito ou extrai a energia cinética que se encontra nos ventos para transformar em energia mecânica, acionando um rotor que está interligado a um gerador elétrico, assim quando incide sobre as pás da turbina, está se movimenta, que por consequência aciona o rotor, que por fim faz o gerador funcionar ocorrendo a conversão em energia elétrica. Tais turbinas tem sua aplicação em sistemas isolados (armazenamento da energia em baterias para uso posterior), sistemas híbridos (utilização de outras fontes associadas com a eólica, como a energia solar), sistemas interligados a rede (conexão direta com a rede de energia elétrica, devolvendo tudo que é gerado para a rede) e sistemas off-shore (turbinas eólicas instaladas nos mares, para aproveitar a maior incidência de ventos).

Na turbina hidráulica o trabalho é realizado transformando a energia hidráulica proveniente de um escoamento de água ou de uma queda de água em energia mecânica, posteriormente acionando geradores para a obtenção de energia elétrica. A aplicação destas turbinas ocorre em grande parte nas hidroelétricas, mas também pode ser aplicada em centrais geradoras e pequenas centrais hidroelétricas, cuja a diferença entre essas se encontra na capacidade de geração.

Nas turbinas a gás o funcionamento acontece através do aproveitamento do gás gerado por queima de combustíveis. E possui três componentes básicos: compressor, câmara de combustão e turbina. Seu funcionamento ocorre com a admissão de ar no compressor, elevando a temperatura e pressão do mesmo, em seguida passando pela câmara de combustão, onde o ar é misturado com combustível, tendo expansão e gerando gases, e esses gases são liberados na turbina, que tem seu acionamento inferido por estes. A aplicação das turbinas a gás ocorrem em termoelétricas (quando a combustão da usina é interna), nas turbinas aplicadas na aeronáutica e no ciclo

combinado com as turbinas a gás em centrais termoelétricas para aumento do rendimento e reaproveitamento do processo.

E por fim nas turbinas a vapor são máquinas que operam com o vapor proveniente da queima de combustíveis, porém a turbina entra em contato somente com o vapor, não com fluido ou resíduo do combustível. Esse vapor faz as pás do rotor girarem, havendo a conversão de energia cinética em potencial, e está por meio de um eixo faz a operação de um gerador, tendo no final a energia elétrica. Estas turbinas podem ser utilizadas em centrais termoelétricas, no ciclo combinado com as turbinas a gás e em centrais geotérmicas.

Motivação

Nos dias atuais a matriz energética do mundo vem sofrendo alterações de fontes poluentes para a utilização de fontes não poluentes, um exemplo de fontes poluentes são usinas que utilizam a queima de combustíveis fósseis, que além de causarem um bom estrago ao ambiente são também recursos finitos. Mas, por outro lado temos fontes renováveis como energia eólica e solar, que vem crescendo com o desenvolvimento tecnológico bem como com os investimentos crescentes nas instalações desses tipos de energia. E a matriz mundial é mantida em sua quase totalidade pelas turbinas sejam elas quais forem, então neste trabalho temos com abordagem principal quatro tipos de turbinas mais aplicados e desenvolvidos atualmente sendo estas: turbinas a gás, turbinas a vapor, turbinas hidráulicas e turbinas eólicas. Afim de com todos os conceitos destes equipamentos sendo mensurados nesse trabalho, possamos no final constatar a opção mais viável e satisfatória para atendimento dessa mudança na matriz.

Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar os conceitos e aplicações das turbinas a gás, a vapor, hidráulicas e eólicas, com o intuito de constatar qual destas por fim se encaixa de forma mais adequada a matriz energética.

Objetivos Específicos

Nesse trabalho o enfoque é analisar e conhecer o funcionamento, componentes, equacionamento e utilização desses quatro tipos de turbina e comparar ao final deste trabalho e constatar a melhor dentre estas, para aplicação na atual demanda surgida na matriz energética, que é a utilização de fontes de energia menos impactantes ao meio que nos cerca.

Organização do Trabalho

Este trabalho foi desenvolvido em cinco capítulos de forma que houvesse uma abordagem geral dos principais assuntos e características do tema abordado. Previamente aos capítulos foi feita uma introdução do tema e apresentação dos objetivos. No capítulo 1 foi realizado a descrição das características das turbinas estudadas, bem como de processos e temas relacionados as mesmas. No capítulo 2 foi apresentada as classificações das turbinas. No capítulo 3 foi abordado as equações fundamentais das turbinas. Ao longo do capítulo 4, foram postas e exemplificadas as aplicações das turbinas. E no capítulo 5, o último desse trabalho foi realizado as conclusões.

1 TURBINAS A VAPOR

As turbinas a vapor são máquinas térmicas de combustão externa, ou seja, os gases gerados na queima não chegam a entrar em contato com os fluídos do interior da máquina que realiza a potência do eixo com a conversão da energia obtida através da queima do combustível ou outra fonte como o bagaço de cana, lixo orgânico, etc.

Nas turbinas a vapor devido a combustão ser externa, o fluído está protegido de ter contato com qualquer composto seja gasoso ou líquido que possa danificar a máquina. Nestas turbinas a transformação em trabalho, se dá a partir da energia contida no vapor, sendo realizado em duas etapas.

Primeiramente, ocorre a conversão da energia admitida do vapor em energia cinética. Isso acontece devido ao escoamento do vapor pelos expansores (orifícios

pequenos com formatos especiais), graças a esta pequena área disponível para a passagem do mesmo, o vapor assume grande velocidade, que influencia diretamente na diminuição da entalpia e no crescimento da sua energia cinética, também ocorrendo quedas na temperatura e pressão, além do aumento do seu volume específico.

Na segunda parte da transformação, toda a energia cinética adquirida no expensor é convertida em trabalho. Tal conversão ocorre através do princípio da reação e ou do princípio da ação.

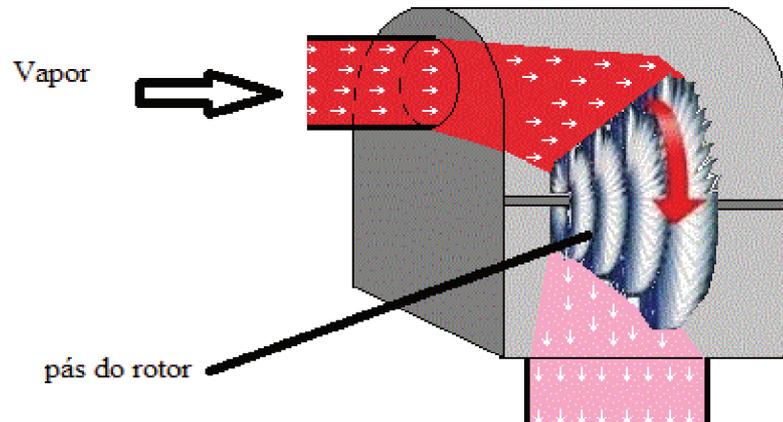
A turbina a vapor é um componente extremamente versátil, sendo largamente utilizada em termelétricas, também usadas em usinas nucleares e de queima de combustíveis fósseis, propulsão marítima e aeronáutica, e indústrias de processos em geral, sobretudo onde se requer energia elétrica e energia térmica para aquecimento. Na indústria em geral podemos encontrar turbinas a vapor em usinas de açúcar e álcool, indústria petroquímica, indústria alimentícia, indústria de papel e celulose e usinas de cogeração através da queima de lixo (apenas dos resíduos orgânicos).

1.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO

O funcionamento de uma turbina a vapor é uma máquina motriz que utiliza a elevada energia cinética da massa de vapor expandido, fazendo com que forças consideráveis, devidas à variação de velocidade, atuem sobre as pás do rotor. As forças, aplicadas às pás determinam um momento motor resultante que faz girar o rotor. São usadas, por exemplo, para o acionamento de geradores elétricos, compressores, turbo bombas e sopradores. Resumindo, a turbina a vapor converte a energia térmica do vapor em energia mecânica.

O rotor gira graças ao momento em que o fluxo do vapor contínuo é direcionado as pás, que acumulam forças criando uma resultante que faz o movimento das pás. Mas esse funcionamento mostrado na Figura 1 é apenas o básico aplicável em geral a todas as turbinas a vapor.

Figura 1- Acionamento do rotor



Fonte: <<https://instrumentacionhoy.blogspot.com.br/2014/12/disenho-de-una-planta-de-energia-equipos.html>>

1.1.2 Componentes das turbinas a vapor

Os componentes básicos de uma turbina à vapor são:

- Carcaça da Turbina: separada em duas partes horizontais, que servem para acoplar e facilitar o acesso as partes estacionárias (mancais, palhetas fixas, válvulas, etc.) para a manutenção e fazer prevenção destes componentes;

- Mancais de apoio: são espalhados nas extremidades do eixo da turbina com o intuito de manter o rotor na posição radial exata. Estes equipamentos de apoio toleram todo o peso do rotor e também qualquer outro esforço que atue ou vem a agir sobre o conjunto rotativo, possibilitando que o mesmo gire livremente e praticamente sem atrito;

- Estator: componente que encapsula o rotor, tendo como principal função a conversão de energia potencial para cinética.

- Rotor: é o elemento fixo da turbina que possui as pás ao seu redor, e que apresenta a função de converter a energia potencial (térmica) do vapor em energia cinética através dos distribuidores (receptores fixos);

- Disco do rotor: componente onde fixa-se a coroa de palhetas;

- Coroa de palhetas: composição de pás dispostas no entorno do disco do rotor, que dependem das características de potência e do tipo da turbina, para saber ao certo quantas coroas serão necessárias;

- Válvulas e sistema de comando: controla a vazão do vapor na turbina, o que afeta a regulação da potência e velocidade da turbina;

- Diafragma da turbina: está acoplado em volta dos rotores sem tocá-los, permitindo através dessa folga a circulação do vapor pelos expansores e realizando a fixação das palhetas fixas localizadas nos bocais;

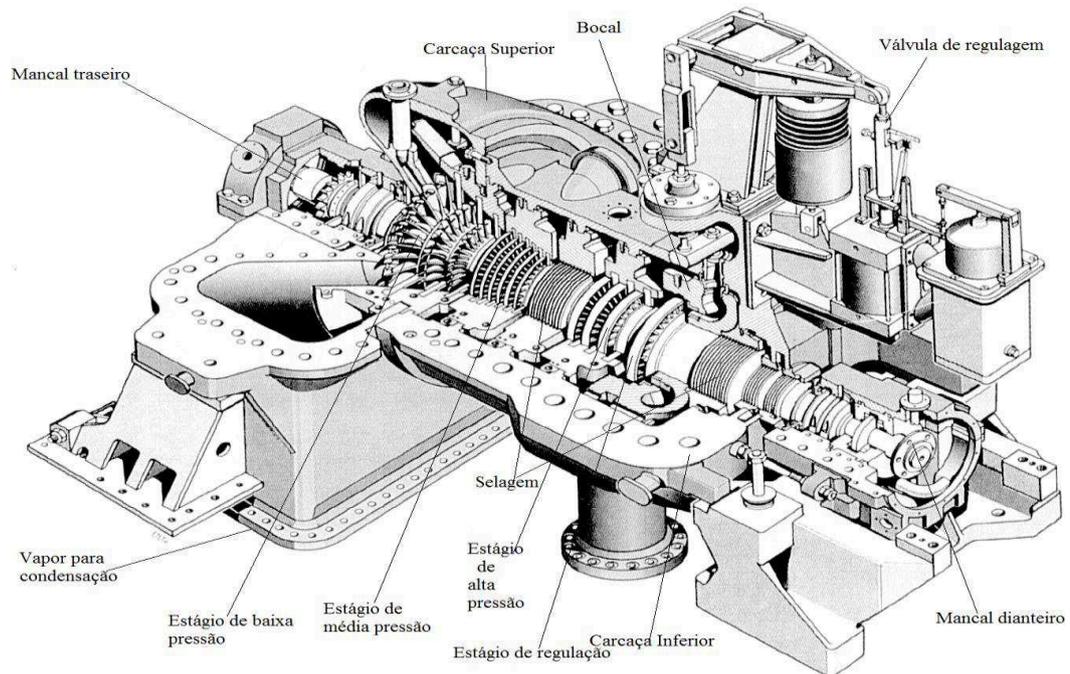
- Labirinto: peças metálicas circulantes com ranhuras existentes nos locais onde o eixo sai do interior da máquina atravessando a carcaça, necessárias para reduzir as fugas de vapor entre o rotor e as partes fixas do diafragma estando próxima ao conjunto de anéis o que faz uma selagem interna;

- Acoplamento: interliga o gerador a turbina;

- Expansor: dispositivo localizado nos bocais móveis ou fixos, este é o local onde ocorre o aumento da pressão do vapor (turbinas de ação) ou a diminuição de pressão do vapor (turbina de reação), independe o tipo de turbina a vapor tendo a função de transformar a energia potencial do vapor em energia cinética;

- Palhetas: tem as palhetas móveis e as fixas. As palhetas fixas orientam, guiam o vapor para o conjunto de palhetas móveis e as palhetas fixas são anexadas à carcaça da turbina. Já as palhetas móveis têm a função de receber o impacto do vapor vindo dos expansores para movimentar o rotor.

Figura 2: Esquema de uma turbina de condensação



Fonte: <<http://termodispositivos.blogspot.com.br/2013/06/turbina-de-vapor-una-turbina-de-vapor.html>>

1.2 REGULAGEM DAS TURBINAS A VAPOR

As turbinas a vapor precisam de regulagem e controle para operar com o sucesso pretendido, melhor dizendo com a efetividade e processo visado, na questão de regulagem existe três tipos cruciais sendo eles: regulagem de potência, regulagem de pressão e regulagem de velocidade.

1.2.1 REGULAGEM DE POTÊNCIA

A partir da carga e a necessidade da mesma, efetua-se o controle da admissão de vapor no rotor. Para tal controle, existem quatro possibilidades distintas sendo: regulagem qualitativa, regulagem quantitativa, regulagem mista e por by-pass.

- a) Regulagem qualitativa: Na entrada da turbina encontra-se um componente chamado válvula de estrangulamento, este componente irá regular a quantidade total de vapor a ser admitido na turbina. Este componente é relativamente efetivo e como sua utilização torna o mecanismo mais barato e simples, é largamente recomendado para médias e baixas potências.

- b) Regulagem quantitativa: Através da demanda da carga que precisa de uma quantidade de vapor específica, determina-se o número de válvulas setas, cada válvula conduz o vapor da caldeira para uma passagem que alimenta a câmara de bocais.

O controle das válvulas se dá por um equipamento acoplado no exterior da turbina, para que possa ser efetuado o ligamento e o desligamento das válvulas. Sobretudo a principal diferença que é uma vantagem dessa regulagem, é a utilização direta do vapor da caldeira apenas com uma leve desigualdade do valor total que sai da mesma, então temos a mínima perda de vapor para utilização.

- c) Regulação mista: Um procedimento que se caracteriza por ser o somatório das duas regulagens já descritas (quantitativa e qualitativa). Com valores de até cinquenta por cento da carga almejada, ocorre a regulagem pela válvula de estrangulamento, caso o valor seja maior a estes cinquenta por cento, opera quantitativo, consegue um rendimento regular para a turbina, onde de fato se pretende funcionar com elas, sempre nessa zona próxima do melhor rendimento.

- d) Regulagem por by-pass: Procedimento realizado apenas quando há uma passagem dor valor máximo da carga pré-estabelecida.

1.2.2 Regulagem de velocidade

Nas turbinas tem-se a possibilidade de chegar a sobre velocidade, graças ao embalo que vai vir a gerar o dobro da velocidade pretendida, então efetuar esse controle é vital.

Tal regulagem é feita por meio de um sistema de guia, que comanda um par de esferas com massas que são articuladas e interligadas ao eixo, e a velocidade desse eixo é equivalente a velocidade do rotor.

1.2.3 Regulagem de pressão

Na maior parte das aplicações colocada na caldeira, para evitar variações muito grandes de pressão, o que inflige diretamente num funcionamento eficaz das turbinas a vapor, mesmo que haja oscilações na carga. Nas partes na qual não se utiliza essa ampla aplicação, usufrui-se dessa regulagem em outras partes do ciclo das turbinas a vapor.

A Regulagem de pressão simplesmente se dá para inibir o vapor que altera a pressão, essa inibição acontece pelo comando de uma válvula.

1.3 CICLO DE RANKINE

Esse ciclo opera com pré-aquecimento ou reaquecimento de água, e o ciclo que é realizado pelas turbinas à vapor, que usufruem do vapor provido da caldeira. Nesse processo utilizando a entalpia como acionador para a conversão de energia, as vezes extraíndo ou expandindo o vapor conforme a necessidade energética.

Claro que todo o funcionamento necessita de algumas condições básicas para efetividade e prevenção dos componentes utilizados para o máximo aproveitamento da vida útil dos mesmos.

Portanto nesse ciclo não pode ter na maioria das vezes tanta diferença de pressão, claro que em situações específicas pode haver grandes diferenças de pressão. A temperatura também deve possuir uma variação mediana para não ultrapassar a capacidade térmica dos componentes. Contudo esse ciclo pode ter diversos e diferentes tipos de combustíveis para a operação. Equipamentos utilizados neste ciclo: caldeira de vapor/fonte de calor, turbina de vapor e condensador/fonte fria.

1.4 TURBINAS A GÁS

A turbina a gás é uma máquina que usufrui diretamente da queima de gases através da combustão dos mesmos. A energia obtida por meio da expansão, age no

rotor, em suas palhetas móveis. Mas o combustível a ser usado não deve gerar cinzas, pois pode vir a danificar os componentes, já que este tipo de turbina não apresenta flexibilidade de escolhas de combustíveis.

Para a expansão seja produzida, é necessário prover uma certa pressão, no ciclo dessas turbinas, esse é primeiro passo na planta, junto, com a escolha de um compressor que trabalhe com fluido. Quando há a expansão dos gases diretamente nas turbinas e nenhuma perda nos componentes, a força absorvida pelo compressor se torna equivalente a força gerada pela turbina. Porém, também pode-se aumentar a força gerada pela turbina, simplesmente aumentando a temperatura na qual se trabalha com o fluido. Portanto para ter o potencial máximo de entrega da turbina a gás, basta, trabalhar com o fluido em altas temperaturas, o que deixa o fluido mais maleável no compressor podendo direcioná-lo melhor na saída do compressor.

Essas turbinas têm três componentes principais: compressor, câmara de combustão e turbina, conforme ilustra a figura 3.

As performances das turbinas a gás são afetadas por dois motivos principais: a temperatura na qual a turbina trabalha e eficiência dos componentes. Se estes forem de valores elevados, maior será a capacidade aproveitada em todo o processo da planta.

Nos dias de hoje, trabalha-se com dois tipos de sistemas de combustão: ambos constantes, mas um constante na pressão e outro constante no volume. Em tese, a eficiência do ciclo de pressão constante é menor que a de ciclo de volume constante, mas nesse segundo caso, as dificuldades mecânicas são mais relevantes. Pois, com o acréscimo de calor no ciclo de volume constante, surge a necessidade de isolamento entre a câmara de combustão e a turbina, tal isolamento é realizado por válvulas. Com uma combustão ininterrupta, tem-se vazamentos ao longo da máquina dos gases, o que dificulta a fabricação de um design dessa turbina eficiente.

1.4.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO

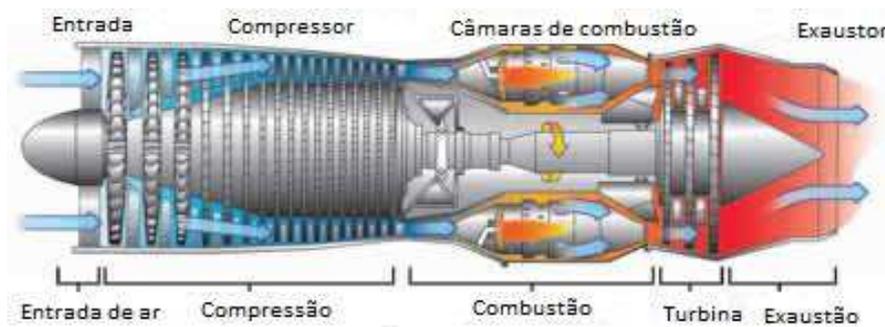
Nestas turbinas a sua operação começa com a admissão de ar refrigerado ou em temperatura ambiente. Ocorre a introdução do ar no compressor, causando um aumento de temperatura e pressão (compressão adiabática). Sendo, que o compressor possui

múltiplos estágios, os quais são constituídos por várias palhetas rotacionais, dispostas em fileiras, que fazem a movimentação do ar e compostos também por palhetas estáticas, responsáveis por transformar a energia cinética em acréscimo de pressão.

O ar que está aquecido e pressurizado, passa então pela câmara de combustão, componente onde coloca-se outro combustível junto ao ar, podendo ser líquido ou gasoso. Durante a combustão, ocorre no fluxo de gases o aumento do seu volume, obtido pelo aumento da temperatura, mantendo a pressão num nível constante.

Saindo da câmara de combustão, estes gases produzem energia potencial acionando as turbinas de potência. Logo após, estes gases ainda com temperaturas elevadas mantidas são despejados.

Figura 3: esquema da turbina a gás usada em aeronáutica, demonstrando processos básicos.



Fonte: <<http://megamaquinas-rick.blogspot.com.br/2011/12/carro-realmente-mais-veloz-do-mundo.html>>

1.4.2 Componentes das turbinas a gás

Turbinas a gás são constituídas basicamente de três elementos principais: compressor, câmara de combustão e turbina. Mas não somente desses elementos, há outros que são utilizados junto a estes.

A) Compressor: composto basicamente de um difusor e rotor, sendo que o compressor pode ser axial ou centrífugo. Comumente apresenta vários estágios, o que influencia na instalação, tendo uma melhora no rendimento, pois esses estágios, possibilitam acoplar um resfriador intermediário, que entre as compressões minimiza a

temperatura do ar. E se for comparado os dois tipos de compressores o axial tem rendimento mais efetivo do que o centrífugo.

B) Câmara de Combustão: este elemento pode ser simples (podendo ser anular ou tubular) ou múltipla (apenas tubular). Ambos com relação a sua colocação nas turbinas, podem ser de construção vertical ou horizontal. Respectivamente, as verticais acopladas perpendicularmente as turbinas, e as horizontais fixadas no entorno ou sob as turbinas.

Nas câmaras de combustão ocorre os seguintes processos com os combustíveis: pulverização, vaporização, mistura do combustível com ar, combustão e inflamação da mistura e diluição dos produtos de combustão, sendo que não há uma parte específica da câmara para cada processo.

Dependendo do tipo de compressor utilizado é o tipo de câmara mais adequado, para compressores centrífugos é melhor utilizar as câmaras tubulares, já para compressores axiais, recomenda-se as anulares.

C) Turbina: a turbina pode ser radial ou axial. E como nas turbinas a vapor, podendo ser de reação (operam com a somatória da pressão e expansão do gás) e de ação (operam com a expansão do gás atuando diretamente na turbina). Este elemento é responsável pela produção de energia e pelo carregamento de um gerador acoplado no final da mesma.

D) Regenerador: através do calor contido nos gases de escape que veem das turbinas, aquece o ar que sai do compressor e atua na câmara de combustão. Assemelha-se aos radiadores comuns, tendo separação das correntes de ar quente e frio, onde estas são utilizadas para troca de calor caso haja necessidade.

E) Resfriadores: todo calor gerado no processo de energia para as turbinas a gás, como o calor do compressor, bem como o do regenerador é despejado neste elemento. Geralmente, usa água para a refrigeração, está passa por tubos com palhetas helicoidais para esse processo. Construídos ao lado das correntes de ar dentro de uma carcaça.

F) Elementos Auxiliares:

Motor de Arranque: motor de indução que injeta energia no compressor que alimenta a turbina a gás, o suficiente até que ocorra o começo da operação na câmara de combustão, quando isso acontece, a turbina começa a sustentar a movimentação do compressor.

Acendedor: equipamento acoplado no interior da câmara, composto por um injetor localizado ao lado do injetor principal, porém numa posição mais inclinada, para que possa acender a chama durante o início do processo, sendo tal acionamento é feito por uma vela de indução e eletromagneticamente.

1.5 COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis utilizados nas turbinas a gás, podem ser de estado: gasoso, líquido ou sólido, mas também deve ser considerado algumas particularidades que este deve possuir, como: ser encontrado em abundância na natureza e ser extraído de maneira rentável, possuir alto volume ou ter por unidade de peso um bom poder calorífico, gerar gases que não afetem muito ao meio ambiente e não afetar os produtos de combustão ou as peças da turbina com as quais entra em contato. Mesmo com todas essas características que o combustível deva conter, nessas turbinas pode-se usar uma grande variedade.

- Combustível sólido: comumente usados em turbinas cujo os ciclos sejam fechados, entretanto, se colocar um trocador de calor, pode ser utilizado em ciclos abertos. Isso ocorre, porque estes tipos de combustível geram impurezas (metais, enxofre, entre outros) e devido ao conteúdo das cinzas.

- Combustível líquido: tem uma grande variedade, desde dos pesados como petróleo até os mais leves com querosene. O petróleo mesmo tendo preço atrativo (mais barato), contém uma desvantagem enorme, já que as cinzas produzidas na sua queima podem afetar o funcionamento da turbina. Alguns combustíveis usufruídos são: petróleo, diesel, álcool.

- Combustível gasoso: gás de alto forno, gás natural e um que está em desenvolvimento atualmente, gaseificação do carvão.

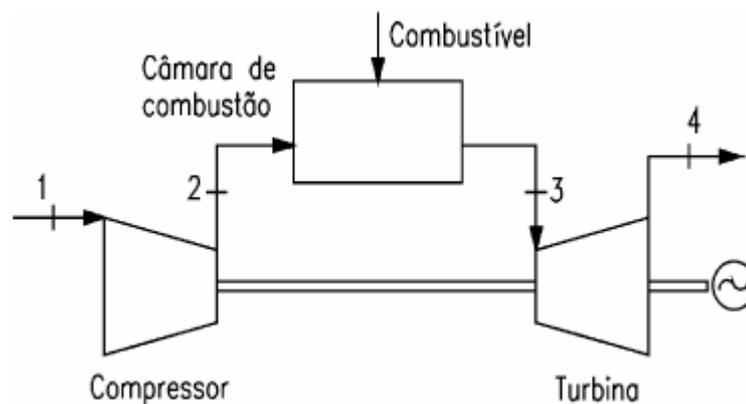
1.6 CICLOS DE OPERAÇÃO

1.6.1 CICLOS ABERTOS

A) Ciclos Abertos de arranjo de eixo simples e duplo:

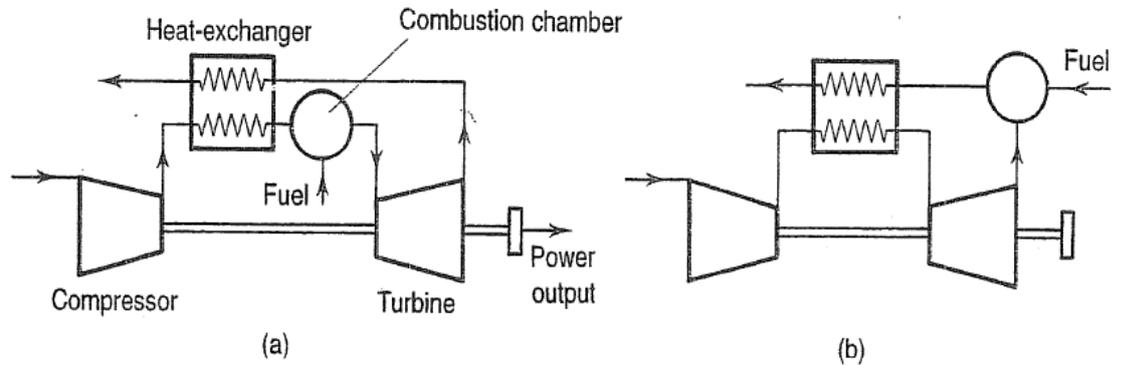
Se a turbina a ser utilizada tiver a necessidade de operar com nível fixo de velocidade e de condição de carregamento para esquemas de geração de energia, a mais indicada é a de eixo único Figura 4. Para esta aplicação, não é de suma importância a máquina se auto ajustar a mudanças de velocidade rotacionais ou de carregamento para operar melhor em meio a variações. No entanto, a alta efetividade da força de inércia, supera o movimento de arrasto das turbinas, isto é uma vantagem, já que evita qualquer dano que possa ser acometido por uma alta velocidade proveniente por falta de carregamento elétrico. Um trocador de calor pode ser adicionado para incrementar a eficiência térmica, porém teria um aumento no tamanho da planta que geraria uma perda de dez por cento de pressão no trocador Figura 5 (a). O trocador é essencial apenas quando o ciclo opera com baixa pressão, já que, com aumento da mesma torna-se menos vantajoso.

Figura 4, Ciclo com arranjo de eixo único.



Fonte: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200052&script=sci_arttext>.

Figura 5, Ciclo de eixo único com trocador de calor



Fonte: Cohen,H; Roders, G.F.C. Gas Turbine Theory. 4th Edition, 1996.

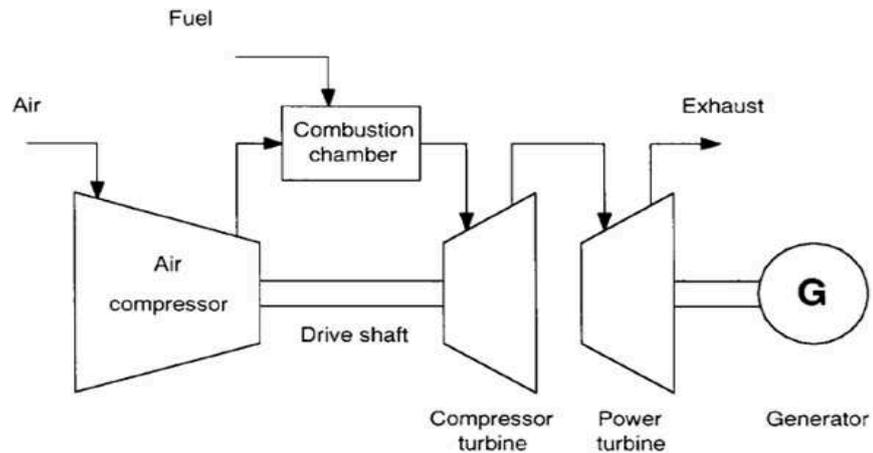
Os designs de compressores para fins aerodinâmicos possibilitaram a utilização de alta pressão que influencia num alcance com um ciclo simples de quarenta por cento de eficiência. Mas, o ciclo básico com trocador de calor dificilmente é aplicado nos designs de turbinas a gás.

Na Figura 5 (b), demonstra uma modificação que visa a utilização de combustível, através da pulverização, gerando componentes que podem corroer ou erodir as lâminas das turbinas. Este tipo ciclo claramente é menos eficiente que o ciclo normal, porque o trocador de calor, acaba transferindo toda a energia gerada ao invés de uma pequena parte como deveria. Contudo, a utilização deste ciclo deve ser levando em conta, quando não há possibilidade de ter um combustível de qualidade razoável, assim optando pelo de baixo custo que por consequência de falta de qualidade, gera mais resíduos.

Nos arranjos de eixo duplo, Figura 6, a turbina de alta potência movimentada o compressor e um conjunto de ações do gerador de gás para a turbina de baixa pressão. Esse ciclo pode ser utilizado em centrais de geração de energia elétrica, com a turbina de força funcionando como um alternador de velocidade sem a necessidade de uma caixa de engrenagens para a redução, isto normalmente tal turbina sendo derivada das turbinas a jato, com um exaustor maior para a turbina de força. Uma vantagem desse arranjo, é que a sua iniciação precisa ser simplesmente montada para desligar o gerador de gás. O arranjo pode começar a operar com eletricidade, um motor hidráulico, com

uma turbina a vapor ou a diesel. A desvantagem de ter uma turbina de força separada, é que no caso de uma descarga elétrica pode ocorrer uma alta velocidade na turbina, para prevenção disto, deve ser feito um sistema de controle.

Figura 6, Arranjo de eixo duplo

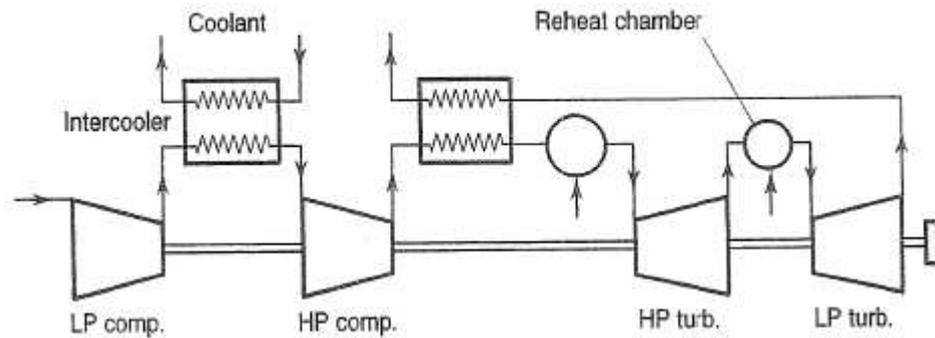


Fonte: <<http://top10electrical.blogspot.com.br/2013/09/single-and-two-shaft-gas-turbines.html>>

A atuação de uma turbina a gás pode ser aprimorada reduzindo o trabalho de compressão ou aumentando o trabalho de exaustão. Uma planta pode ter um arranjo com resfriador, trocador de calor e reaquecedor Figura 7, que é chamado de ciclo complexo. Este tipo de ciclo possibilita produzir uma alta energia de saída, controlando a quantidade de combustível com o reaquecedor, deixando o gerador a gás atuando próximo as condições ideais.

Desde dos anos 2000, este arranjo complexo é proposto quando a necessidade da eficiência térmica numa turbina com menor temperatura e menor pressão possível. Pois, atualmente é de suma importância o baixo custo e uma planta com menos componentes o possível, o que não enfoca na eficiência térmica que é um dos principais objetivos quando se usufrui das turbinas a gás.

Figura 7, ciclo complexo com: reauecedor, reauecimento e refrigeração.



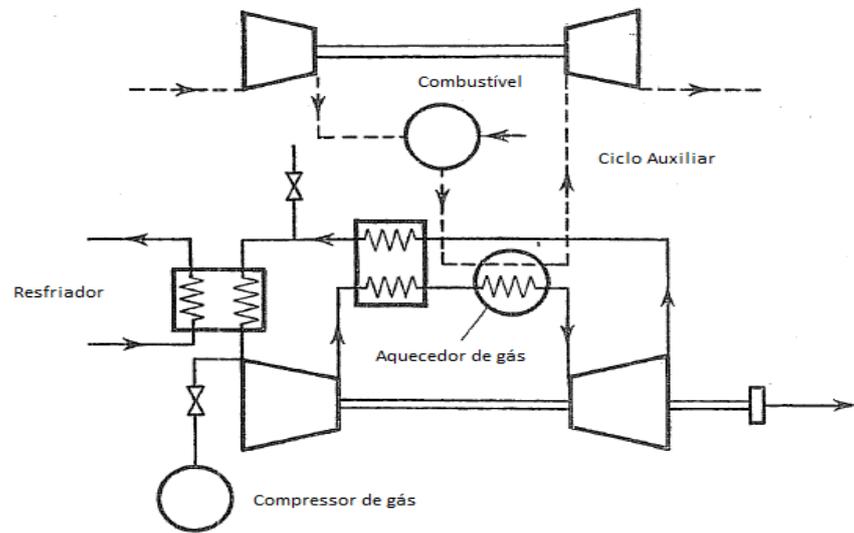
Fonte: Cohen,H; Roders, G.F.C. Gas Turbine Theory. 4th Edition, 1996.

Da figura de ciclo complexo: Low power compressor (Lpc) : compressor de baixa pressão, High power compressor (hpc) : compressor de alta pressão, high power turbine (hpt): turbina de alta potência e low power turbine (lpt): turbina de baixa potência.

1.6.2 Ciclos Fechados

Os ciclos fechados possuem muitas vantagens que podem ser destacadas, mas a mais relevante é a possibilidade de se trabalhar com alta pressão durante o ciclo todo, isto pode resultar na diminuição das turbinas de acordo com a saída e possibilitando a alteração de poder de saída mudando o nível de pressão do circuito. Então, isso possibilita uma ampla variedade de carregamento das cargas sem alteração na temperatura máxima do ciclo, porém com uma pequena variação na eficiência. A desvantagem pontual é a necessidade de um sistema externo de aquecimento, que envolve um ciclo auxiliar e introduz uma temperatura diferente entre o fluido e os gases de combustão. As temperaturas de trabalho do aquecedor elevam ainda mais o limite de temperatura do ciclo principal. Na Figura 8, esta demonstrado um ciclo fechado.

Figura 8, ciclo fechado simples



Fonte: Cohen,H; Roders, G.F.C. Gas Turbine Theory. 4th Edition, 1996.

Este ciclo inclui um resfriador no ciclo principal do fluido entre o aquecedor e o compressor, assim, nesse arranjo particular o aquecedor de gás faz parte do ciclo auxiliar e o controle é feito por uma válvula e um compressor de gás suplente, localizado abaixo do resfriador.

1.7 TURBINA EÓLICAS

Aerogerador ou turbina eólica, trata-se de uma máquina, capaz de absorver (ou até mesmo ‘extrair’) a energia provida dos ventos. Isto, graças aos seus equipamentos, como rotor aerodinâmico que atua na absorção da cinética dos ventos, convertendo esta potência cinética em mecânica, que por sua vez por intermédio de um gerador elétrico converte esta potência em energia elétrica. Essas turbinas atuam interligando o ar em movimento ao processo de acionamento de um gerador, funcionando como as hélices de aeronaves, ou simplificando, elas operam de maneira oposta a um ventilador.

Um fato a se considerar dessas turbinas e o tipo de energia utilizada, a energia eólica, que provém dos ventos, que é uma fonte de energia inesgotável e limpa, o que classifica esse tipo de energia como uma fonte de energia renovável.

1.7.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO

Tais turbinas, recebem a ação direta da movimentação das massas de ar, ou seja, o vento em movimento atuando sobre as pás do rotor, conseqüentemente girando os rotores, atuando no seu eixo central de sustentação capturando parte da energia cinética provida através dos ventos. A movimentação do eixo central se dá mais lentamente, mesmo que as pás externas do rotor estejam girando mais rapidamente.

Em suma grandeza das turbinas atuais, temos controle de passo, um mecanismo que atua nas pás do rotor por meio de uma caixa, fazendo que as mesmas consigam uma angulação mais precisa para a captação dos ventos. Nas turbinas de menor de tamanho, este controle é feito completamente por meio mecânico.

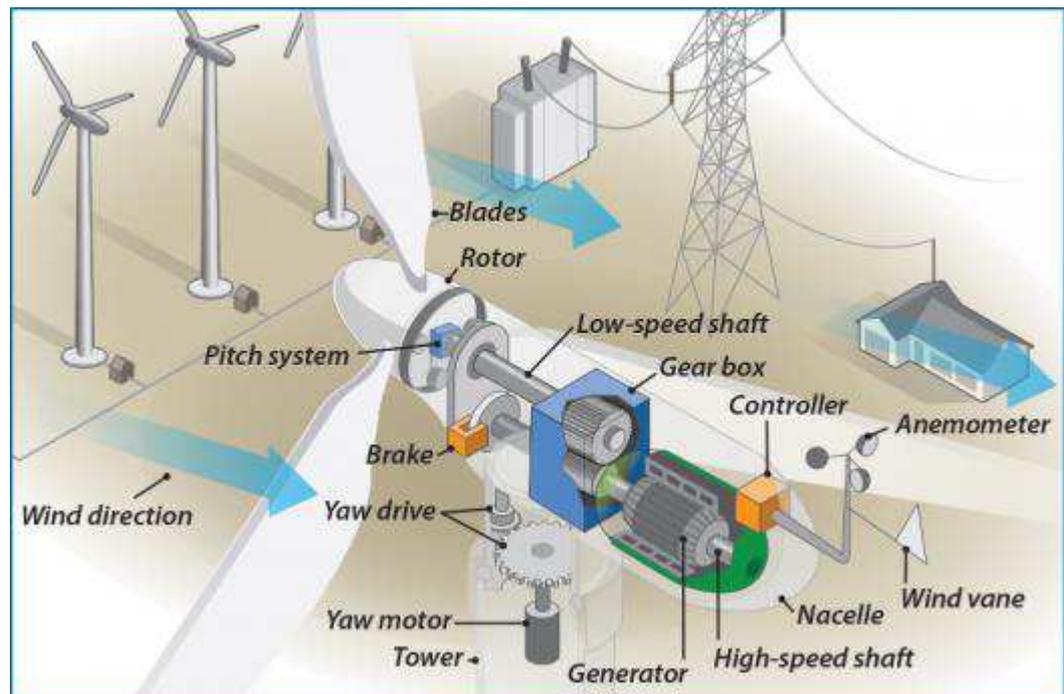
Então na casa de máquinas ocorre a transformação da baixa rotação do eixo de acionamento, para uma rotação com velocidade mais elevada, para uma ativação eficaz do gerador. Este por meio do giratório, extrai energia cinética e converte em eletricidade.

Sendo que as medições do direcionamento e da velocidade dos ventos, acontece por intermédio dos anemômetros e aletas de ventos. Assim, um transformador elevador atua nessa eletricidade, elevando para um nível suficiente para a distribuição nas redes

elétrica, que depois, seguem para outras subestações e redes de distribuição, até por fim chegarem aos consumidores, a Figura 9 ilustra o aspecto de uma turbina eólica.

1.7.2 Componentes das turbinas eólicas

Figura 9, esquema dos componentes de uma turbina eólica:



Fonte: <<https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>>

Anemometer (Anemômetro): realiza a medição da velocidade dos ventos, e em seguida transmite esses dados para o controlador.

Blades (pás): com a incidência do ventos estas rodam, e esta rotação gera uma força de sustentação que faz o rotor girar. Em suprema maioria as turbinas apresentam apenas três ou duas pás.

Brake (freio): atua em condições emergenciais parando o rotor seja de modo hidráulico, elétrico ou mecânico.

Controller (controlador): opera a operação de ligamento e desligamento das turbinas, no entanto, em condições de ventos muito elevados, efetua o desligamento, devido a possibilidade de danos que possam ocorrer a turbina.

Gear Box (caixa de engrenagens): faz a interligação dos eixos de alta e baixa velocidade, assim opera elevando as rotações de 30-60 rpm(rotações por minuto), para um valor entre 1000-1800 rpm, valores necessários e requeridos por grande parte dos geradores para a produção de eletricidade. Apresenta duas desvantagens: peso e custo elevados, devido a tais, há estudos para a implementação de geradores menores, diminuindo assim a velocidade rotacional a ser atingida para atuação dos mesmos.

Generator (gerador): são utilizados tanto geradores síncronos como assíncronos, depende de com que velocidade rotacional deseja-se operar.

Nacelle : possuem espaço o suficiente para alojamento da caixa de engrenagens, gerador, controlador, eixos de alta e baixa velocidade e freio.

Pitch (passo): giram as pás para manter uniforme a velocidade atuante no rotor, mantendo essa rotação mesmo com ventos fracos ou fortes que não são adequados para a produção de eletricidade.

Rotor (rotor): a junção do cubo do rotor e das pás, denomina-se rotor.

Tower (torre): tem a função de suportar toda a estrutura da turbina, sendo altas, devido ao fato dos ventos aumentarem de acordo com a altura, então, deste modo captam mais energia influenciando na geração de mais eletricidade. Constituídas de concreto ou aço tubular.

Wind Vane (medidor de direção do vento): efetua a medição da direção do vento, e em conjunto com o mecanismo de orientação direcional comunicam esta direção para orientar corretamente a turbina.

Yam Drive(mecanismo de orientação direcional): mantém o rotor das turbinas upwind de frente para o vento, mesmo que o vento altera sua direção.

Yam motor(motor do mecanismo de orientação direcional): efetua o ligamento do mecanismo de orientação direcional.

1.8 VENTOS

Os ventos podem ser definidos meramente como movimentação de ar. Sendo que, tal movimento é proveniente do aquecimento não singular no planeta, que instiga a circulação das camadas de ar. Essa movimentação sempre ocorrendo das áreas de alta pressão para as áreas de baixa pressão. Grande parte da radiação do Sol que incide neste planeta, atua mais nos arredores da linha do equador do que nos polos.

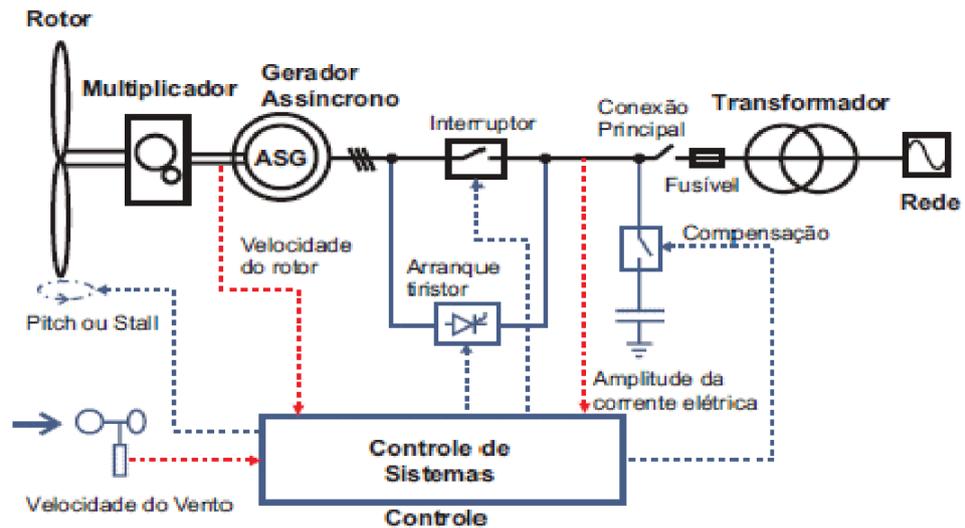
De toda a radiação somente uma pequena quantidade é captada, e transformada em energia cinética, que através das diferenças de temperatura façam a movimentação de ar da atmosfera. A matriz eólica no planeta não é limitada apenas pela falta de incidência de ventos ou de materiais para a construção de turbinas, componentes, mas sim devido a fatores geográficos (dependendo da localização, a radiação solar atua mais, provocando mais ventos, países próximos a linha do equador e com espaço territorial amplo tem grande possibilidade da utilização da matriz eólica), econômicos e sociais.

1.9 AEROGERADORES TECNOLOGIAS

1.9.1 AEROGERADORES COM VELOCIDADE CONSTANTE

Nestes aerogeradores os geradores estão interligados diretamente na rede de energia elétrica. Sendo a rotação da turbina determinada pela rotação do gerador que é influenciada pela frequência da rede. Estes aerogeradores utilizam geradores de indução ou assíncronos, que apresenta duas vantagens: custo baixo e simples de construção e não precisam de acoplamento de dispositivos para sincronismo. Tendo também desvantagens, como demanda de potência reativa e suas altas correntes no momento de partida. A Figura 10 ilustra a topologia de aerogeradores a velocidade constante.

Figura 10: Esquema elétrico de um aerogerador com velocidade constante



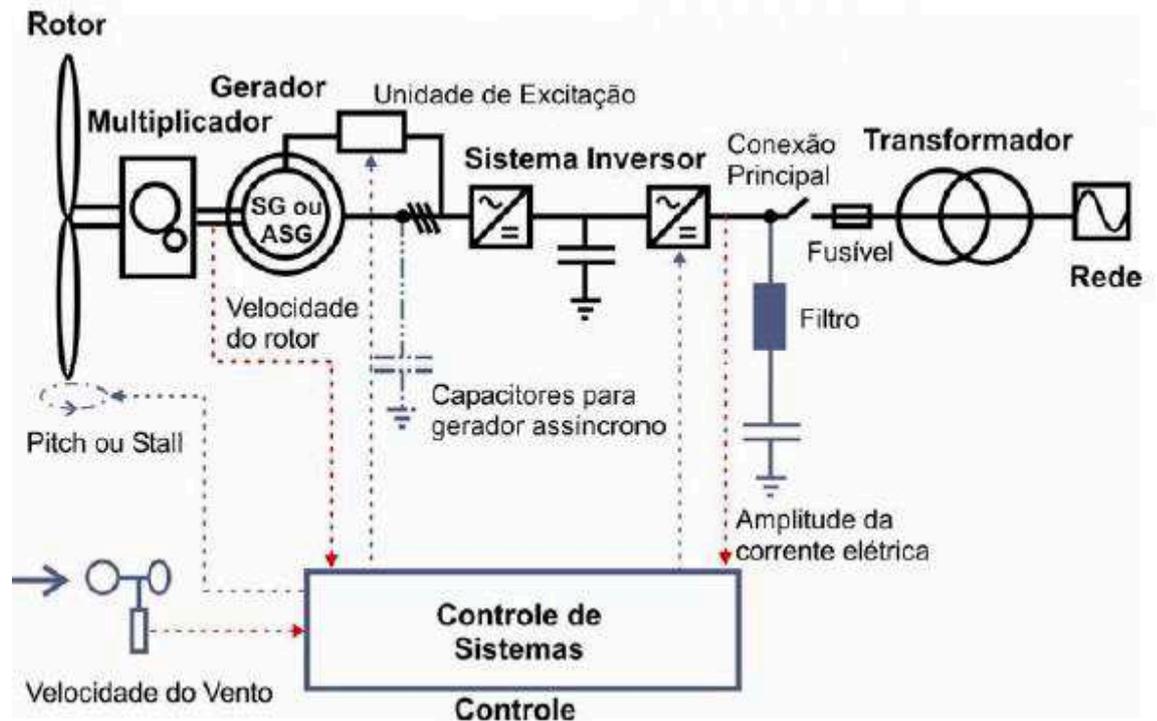
Fonte: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfNbkAK/proposta-eficiencia-ev-impressao-1?part=8>>

1.9.2 Aerogeradores com velocidade variável

Estes aerogeradores utilizam tanto motores assíncronos como motores síncronos. A interligação ao sistema elétrico ocorre por um conjunto de inversor/retificador (conversora de frequência eletrônica). O gerador produz uma tensão, que em seguida é retificada e resulta numa corrente contínua sendo invertida de maneira eletrônica por meio de tiristores que atuam no controle da frequência de saída. A frequência do gerador depende da rotação da turbina ocorrendo oscilações, entretanto, com a conversora efetuando controle, mantém-se esta rotação sincronizada e constante com o sistema elétrico. A Figura 11 ilustra a topologia destes aerogeradores.

No caso da opção de se utilizar geradores assíncronos, para que o gerador excite necessita-se de energia reativa, podendo ser realizado por capacitores que sejam dimensionados de maneira adequada para esta aplicação, isto é, auto-excitação. Neste tipo de instalação, os capacitores devem ser interligados ao esquema elétrico antes do retificador, já que o isolamento galvânico ocorre por intermédio da conversora de frequência, assim inibindo a absorção de energia reativa externa.

Figura 11: Esquema elétrico de aerogerador com velocidade variável com a utilização de uma conversora de frequência.



Fonte: pdf baixado, energia eólica princípios e tecnologias, CRESESB.

1.10 TURBINAS HIDRÁULICAS

Tais turbinas são máquinas motoras que tem o objetivo de converter energia hidráulica provida de escoamento ou de quedas em energia mecânica. Esses equipamento tendem a converter grande parte, do fluxo de água contínuo que a cruza em trabalho mecânico. Sendo que, estas turbinas tem vários tipos, dos quais vale destacar os mais utilizados e principais que são: turbina Francis, turbina Pelton, turbina Kaplan e turbina Bulbo.

Essas variações de turbinas hidráulicas são construídas para serem utilizadas em hidrelétricas, mas cada tipo destas, tem uma determinada faixa de altura de queda para operação.

1.10.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO

As turbinas hidráulicas mesmo possuindo uma vasta gama de formas e tamanhos, todas tem princípios básicos de funcionamento equivalentes.

A água proveniente da queda entra pela tomada d'água que se encontra a montante da usina, e por intermédio de um condutor forçado é conduzida até a entrada da turbina. Na turbina a água se movimenta entre as palhetas móveis que controlam a vazão volumétrica provida a turbina. Caso haja necessidade de um aumento ou diminuição da potência, as palhetas respectivamente, se abrem ou fecham. Depois da passagem pelas palhetas a água chega no rotor da turbina.

Porém nas turbinas Pelton, ao invés de palhetas, tem-se um bocal com agulha móvel, este equipamento que rege a vazão deste determinado tipo de turbina.

1.10.2 Estruturas das turbinas hidráulicas

Para citar como são os componentes dessas turbinas, usaremos dois tipos como exemplo, por ser mais utilizados e os mais conhecidos, turbina Francis e turbina Pelton.

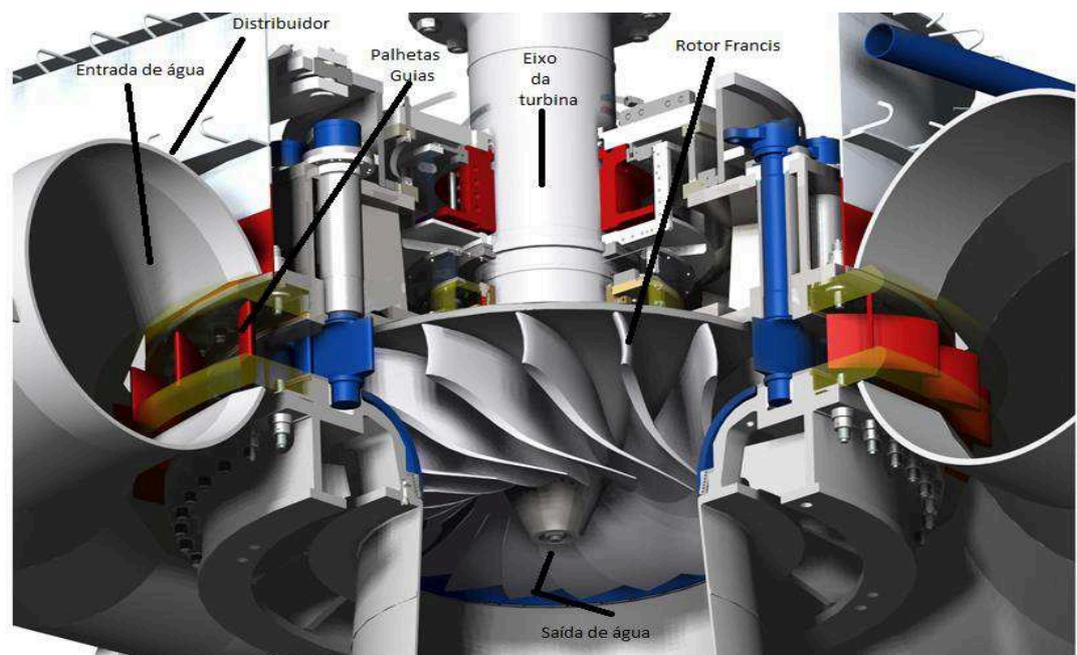
A) Turbina Francis: esta turbina foi inventada pelo engenheiro britânico James Bicheno Francis, o qual carrega o nome. E desde de seu aparecimento, vem sendo constantemente aprimorada com o passar dos anos, já que é uma turbina de reação com alta taxa de eficiência, beirando os 90% dependendo da aplicação. Também sendo aplicada em uma vasta faixa de alturas entre 20 e 700 metros. Atua convertendo tanto energia cinética, como a transformando em trabalho a energia de pressão, pois admite água em pressão em direção radial e despeja essa água em um direcionamento axial, conforme ilustra a Figura 12.

Nesses equipamentos o rotor se localiza de maneira interna ao distribuidor, assim quando a água atravessa a superfície do rotor, chega próximo ao eixo. Nessas turbinas dependendo da sua velocidade específica, tem-se vários formatos cabíveis aos rotores, podendo ser dispostos em: extra rápida ou rápida, lenta e normal.

No distribuidor há uma disposição de um conjunto de pás no envolto do rotor, que permitem a orientação durante a operação, admitindo-se ângulos mais propícios às descargas com as quais operam, tem em vista a redução da perda hidráulica. As pás o distribuidor possuem em paralelo ao eixo do rotor um eixo de rotação, assim quando giram, podem ampliar a seção escoamento ou fechar a seção por completo.

Estas turbinas apresentam um contato mais direto com as águas dos canais ou rios nas quais são aplicadas, contudo, sendo altamente recomendável sua aplicação em usinas com águas que não tenham tanto teor sólido, pois acabam gerando uma erosão, um desgaste em excesso nesse equipamento.

Figura 12: componentes de uma turbina Francis



Fonte: <<http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-francis-561.html>>

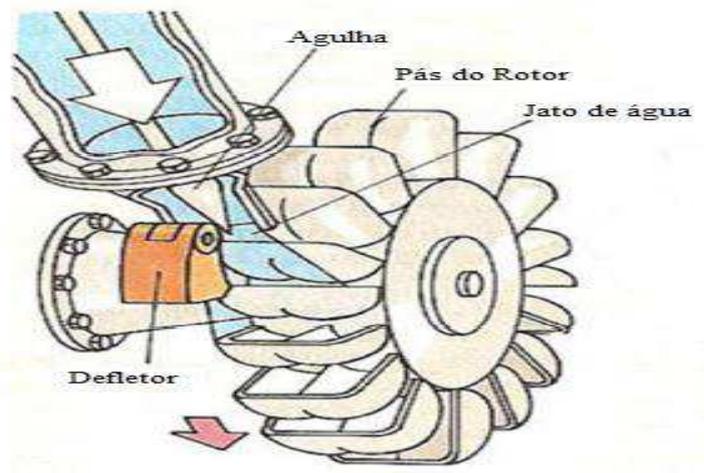
B) Turbina Pelton: foi patenteada em 1880 pelo engenheiro norte americano Lester Allen Pelton, o qual originou seu nome. Seu formato se assemelha as antigas rodas d'água que eram utilizadas em moinhos. A Figura 13 ilustra o aspecto desta turbina.

Os rotores Pelton tem um bocal que atua como distribuidor, que possui seu formato de maneira adequada para condução de água para as pás do rotor. Essas

turbinas operam com rotações elevadas, e dependendo da potência pretendida durante sua operação pode funcionar com dois, quatro ou seis jatos. Na parte interna do bocal há uma agulha que regula a vazão. Este rotor apresenta por toda sua volta conchas, que com impacto com a água vinda das agulhas, fazem o rotor girar.

Essas turbinas ainda possuem outro componente a ser considerado o defletor a jato. Este equipamento age mais lento que a agulha, quando existe a necessidade de redução da vazão, assim, evitando um provável sobrepressão, nas válvulas, no bocal e em todo percurso da tubulação forçada. Sendo que algumas turbinas devido à alta potência que operam, podem ter um bocal direcionado para as costas das pás, atuando na frenagem.

Figura 13: Turbina Pelton



Fonte: turbinas capítulo 6, pdf.

1.10.3 Componentes das turbinas hidráulicas

-Turbinas Francis:

Nas turbinas Francis são constituídas de rotor, palhetas guias e distribuidor. O distribuidor é composto por um aglomerado de pás dispostas na periferia do rotor, dando a possibilidade de um ajuste no ângulo de entrada para cada variação da vazão admitida, que não evita mas reduz as perdas hidráulicas.

Já as pás do rotor tem uma função primordial nessa turbina, fazer com que aconteça a rotação do rotor. Estes componentes possuem um eixo de rotação perpendicular ao eixo da turbina, operando de maneira equivalente e simultânea, seja no fechamento completo ou na ocorrência de uma admissão elevada.

E o rotor Francis é o equipamento que se obtêm a energia mecânica desejada. Conectado rigidamente com a parte inferior do eixo da turbina, de modo perfeitamente concêntrico com o distribuidor, preenchendo todo o espaço circular que o mesmo delimita.

-Turbinas Pelton:

As turbinas Pelton tem alguns componentes essenciais: distribuidor, rotor, alojamento, câmara de distribuição, sistema de travagem e o eixo da turbina. O distribuidor dessa turbina faz a injeção de água, cada um dos equipamentos tem como função direcionar um jato de água cilíndrico de seção uniforme no rotor e também regula a vazão. Este equipamento é composto pelas seguintes partes: câmara de distribuição, injetor, bico, agulha, defletor e componente regulador de velocidade.

A câmara de distribuição é o prolongamento do tubo forçado, acoplado a este por uma flange que faz a junção entre a câmara de distribuição e o tubo forçado se encontra a válvula de entrada da turbina. A principal função deste componente é conduzir a água até o injetor, e também servindo de suporte para os demais mecanismos que constituem o distribuidor.

O elemento mecânico projetado para direcionar e regular o jato de água é o injetor, sendo composto por:

- Bocal: constitui um bocal alojado no final da câmara de distribuição. Este componente atua direcionando o jato de água, tangencialmente para o entorno do rotor, de tal maneira, que a sua extensão gera um ângulo de 90° com os raios do rotor.

- Agulha: consiste numa haste localizada concentricamente na parte interna do corpo do bocal, com movimento longitudinal em ambas as direções.

- Defletor: é um equipamento mecânico, que pode se posto, de forma intercalada sobre as diferentes trajetórias do jato de água entre o rotor e o bocal, a fim de desviar parte da água ou a totalidade, para evitar a fuga do rotor.

No equipamento regulador de velocidade, têm-se um conjunto de dispositivos que tem como base servomecanismos, com o intuito de manter de forma constante a rotação do rotor.

Estas turbinas usam os rotores Pelton, que é o componente fundamental onde há a conversão de energia hidráulica em energia mecânica. Tendo sua composição feita por uma roda motriz e pelas pás. A roda motriz é fixada de forma rígida por intermédio de chaves e âncoras adequadas. Seu entorno é mecanizado de forma adequada para escorar as pás. As pás são fabricadas para receber a ação direta do jato de água.

A câmara de descarga destas turbinas é o componente onde a água é despejada para o dreno, pois depois que a mesma atuou na movimentação do rotor, para evitar danos ao rotor causado pela ação dos jatos de água essa tem que ser retirada. O eixo das turbinas Pelton, fica preso ao rotor de forma rígida e localizado de forma correta em mancais lubrificados, fazendo a transmissão do movimento de rotação para o eixo acoplado ao gerador.

2 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS A VAPOR

Essas turbinas podem ser separadas conforme diversas especificações e modos de operações, sendo agrupado de acordo quanto á direção de escoamento, ao princípio de funcionamento e quanto a pressão de escape e ao número de estágios.

2.1.1 QUANTO AO PRÍNCIPIO DE FUNCIONAMENTO

- **Turbinas de Ação:** são mais robustas e duráveis. Funcionam quando há expansão do vapor no bocal (ou expensor) isso influencia na queda de pressão do vapor no bocal que diretamente afeta a temperatura e resulta também em uma queda de entalpia, de tal forma que a energia potencial é convertida em energia cinética, através do contato do jato de vapor em alta velocidade com as palhetas móveis, e depois essa energia cinética é convertida em energia mecânica pela rotação do eixo. A Figura 14 ilustra este tipo de Turbina.

Figura 14- Turbina á vapor de ação



Fonte: <<http://www.grupotgm.com.br/turbinas-45-bar-a-450-c-20-mw-contrapressao-tm-e-tme>>

- **Turbinas de Reação:** Operam com a somatória de duas forças (estas sendo a expansão e pressão do vapor), que em conjunto provocam a rotação do eixo. Ocorre quando utilizam a expansão e a pressão do vapor. Não há expansão por completo do vapor nos bocais, porém, continua a perder pressão quando a sua velocidade diminui na

roda móvel, provido do intenso movimento nas palhetas móveis. Então, apenas uma parte da energia potencial é convertida em energia cinética, pois a outra parte se transforma na própria roda móvel, conforme ilustra a Figura 15.

Tais turbinas devem ser bem planejadas e construídas, para evitar o máximo possível de vazamento de vapor, já que tal elemento é o enfoque para a operação dessas turbinas.

Figura 15- Turbina a vapor de reação



Fonte: <<http://www.grupotgm.com.br/turbinas-140-bar-a-540-c-150-mw-contrapressao-bt-e-bte>>

2.1.2 Quanto à direção do escoamento

Nesta classificação com relação ao fluxo da turbina ou escoamento há uma divisão em duas partes, denominadas de acordo com a direção assumida por este vapor na operação da turbina. Podendo ser turbinas axiais e radiais.

- Axiais: em tais turbinas, o vapor percorre trajetórias paralelas ao eixo da própria turbina. Apenas variando no número de estágios dessas turbinas pode-se ter uma gama de grau de expansão para se operar, sem contar que para essa vertente são de fácil construção.

Exemplos de turbinas axiais são as turbinas de acionamento de geradores e de propulsão.

- Radiais: o vapor percorre uma direção perpendicular ao eixo pelo raio geométrico, e as palhetas são agrupadas e acopladas sobre o disco. As turbinas radiais se subdividem em duas variações; centrífuga radial (o vapor se desloca do trajeto do eixo à proximidade do rotor) e centrípeta radial (o vapor se desloca na trajetória contrária da radial centrífuga radial).

2.1.3 Quanto á pressão de escape

Podem ser divididas nesta classificação, turbinas de escape livre, condensadoras, contrapressão e combinadas.

- **Livre escape:** o despejo do vapor é feito de maneira simples e direta para a atmosfera, o que implica a igualdade entre a pressão da atmosfera e a pressão de saída do vapor;

- **Condensadoras:** onde há um condensador na saída, neste equipamento ocorre á condensação do vapor o que afeta diretamente na redução dos valores de pressão e de temperatura, o que gera melhor eficiência térmica e queda de entalpia durante todo o ciclo. A Figura 16 ilustra o aspecto deste tipo de turbina.

Figura 16 - Turbina condensadora



Fonte: <http://www.grupotgm.com.br/tgmdownloads/turbinas/portugues/tgm_folder_turbinas_produtos.pdf>

- **Contrapressão:** onde a pressão assumida pelo vapor na saída é mais alta que a pressão atmosférica, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17- Turbina de Contrapressão.



Fonte: <http://www.grupotgm.com.br/tgmdownloads/turbinas/portugues/tgm_folder_turbinas_produtos.pdf>

- **Combinadas:** parte do vapor faz o processo normal e chega a um condensador ou a saída, a parte restante é retirada para utilização em alguns outros usos e principalmente em grande parte das ocasiões o vapor é usado na calefação.

2.1.4 Quanto ao número de estágios

- A) De um só estágio (turbina Laval ou simples):

Realiza a parte da transformação de entalpia por meio dos bocais à energia cinética e também a transformação de energia que se dá nas palhetas, todos esses processos se decorrendo em apenas um único estágio de velocidade e pressão. Proveniente da fácil construção e rendimento baixo, recomenda-se em lugares onde são necessárias baixas potências.

- B) Com múltiplos estágios de velocidade e um único estágio de pressão:

Ocorre a transformação de entalpia em energia cinética pela expansão do vapor no bocal, e a velocidade é conseguida através da conversação da diferença de pressão no rotor inicial. Essa transformação se dá em múltiplos estágios de velocidade. Porém

todos os estágios só se diferenciam nos rotores com relação ao diâmetro, já que em todos os estágios a quantidade de vapor que deve passar é igualitária.

- C) Com múltiplos estágios de pressão e um único estágio de velocidade:

É uma turbina denominada com Prazos, que se quisermos descrever como está se assemelha com relação à sua construção basta descrevermos como um conjunto de turbinas simples interligadas em série.

Os múltiplos estágios de pressão se subdividem para cada estágio, mas as seções têm tamanhos variados graças à elevação do volume específico de vapor em cada estágio. Então nessas turbinas como tem-se operação com baixas diferenças, a admissão de velocidade também se torna pequena, assim quase não há perda por atrito.

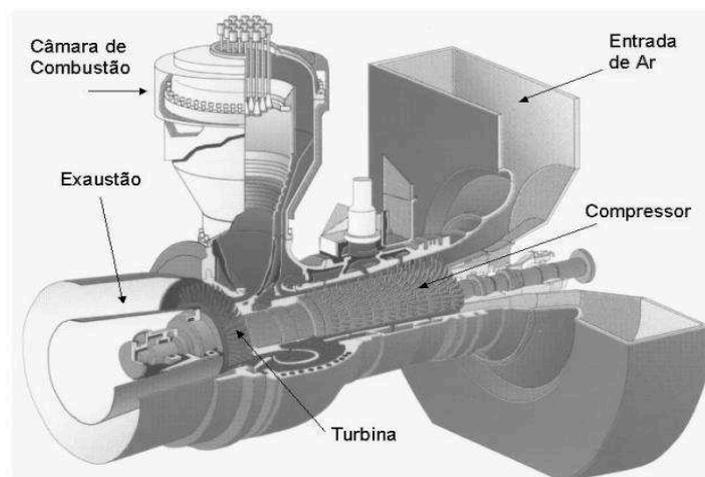
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS A GÁS

As turbinas podem ser classificadas de acordo com as condições nas quais são empregadas, subdivididas em: estacionária ('heavy-duty') e propulsão (aero derivativas). E também podem ser especificadas como as turbinas à vapor, sendo de ação ou reação.

2.2.1 DE ACORDO COM AS CONDIÇÕES DE EMPREGO

A) Heavy-duty: aplicada principalmente em operações onde há necessidade de se obter carregamento ininterrupto e velocidade, como na propulsão naval e geração de energia elétrica. As características são: robustas, extremamente adequadas a qualquer combustível a ser utilizado, de ciclo simples, sua relação de pressão pode variar, conforme ilustra a Figura 18.

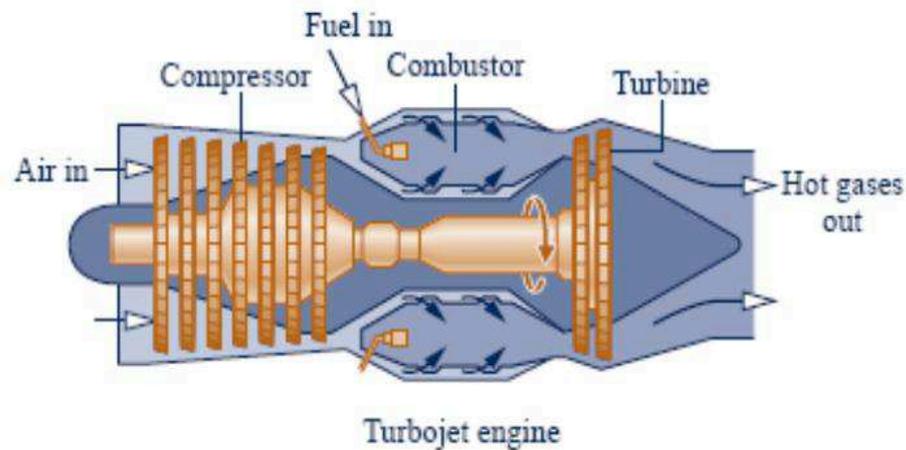
Figura 18, exemplo de uma turbina heavy-duty.



Fonte: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/prioste/materiais/A17_GEE_Termicas_Gas.pdf>

B) Aero Derivativas: A Figura 19 ilustra as turbinas aplicadas em indústrias e na aeronáutica. As suas características são: eficiência e maior confiabilidade com relação as estacionárias, mas com custo elevado, compactadas em áreas menores e apresentam configuração que possibilita através da flexibilidade a manutenção.

Figura 19, turbina aero derivativa utilizada em propulsão aeronáutica.



Fonte: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/prioste/materiais/A17_GEE_Termicas_Gas.pdf>

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS

2.3.1 ROTORES DE EIXO VERTICAL

As turbinas eólicas com rotores de eixo vertical, possuem três grandes exemplos, rotores Savonius, rotores Darrieus e rotores no formato H.

Este tipo de turbinas, possuem duas vantagens a terem ênfase, a primeira é com relação as mudanças de direção do vento, sendo que tais não necessitam de equipamentos ou mecanismos para acompanhar essas variações. A segunda, devido a seu design simples, que permite construção ao nível do solo dos mecanismos mecânicos e elétricos, caixa de engrenagens, gerador e sem mudanças na movimentação projetada para os rotores. Entretanto, contrariando a isso, as desvantagens como: baixa velocidade de ponta, impossibilidade de se iniciar por meio da própria turbina e não possuir capacidade de controlar potência e velocidade das pás.

Nos rotores do tipo Darrieus (nome dado a esse tipo de rotor, graças ao seu desenvolvimento feito pelo francês Geoges Jean Marie Darrieus), as lâminas são dobradas de modo curvilíneo e acopladas nos cubos da parte superior e inferior, tendo

assim uma movimentação aerodinâmica pelas forças de sustentação em torno de um sólido geométrico. Sendo construídas com duas ou três pás no rotor, devido a característica da lâmina tornar a fabricação complicada, esta característica está ilustrada na Figura 20.

Figura 20: rotor do tipo Darrieus



Fonte: <<http://sustainingourworld.com/2015/01/01/alternative-wind-turbine-designs/>>

Outro tipo de rotores de eixo vertical, são os rotores do tipo H, uma variação feita a partir dos rotores Darrieus. Ao invés das lâminas curvas essas possuem lâminas retas ligadas ao rotor por meio de estruturas de suporte. A Figura 21 ilustra estes tipos de turbina. Projetadas a partir dos planos do engenheiro inglês Musgrove, sendo testadas para possibilitarem ao mínimo um grau aproximado de controle da velocidade e da potência. Contudo mesmo com sua estrutura simples, com o gerador integrado ao rotor e permanentemente excitado e sem caixa intermediária, seu custo ainda impossibilita a utilização, já que comparado com os rotores de eixo horizontal tem custo elevado.

Figura 21: rotor do tipo H.



Fonte< <https://www.flickr.com/photos/kecko/6948309280/in/photostream/>>

E os rotores Savonius possuem estruturas simples constituídas de duas metades de cilindros acopladas em torno de um eixo, em direções contrárias, gerando um formato em ‘s’, e que permite a captação de ventos em todas as direções. Em grande maioria, utilizados para gerar energia para pequenas bombas de água. Rotores Savonius apresentam um design aerodinâmico otimizado, porém a baixa velocidade de ponta, comparando com seu baixo coeficiente de força. Mas, outro ponto a se destacar, é a possibilidade desses rotores de usar forças de arrasto para ampliar esse coeficiente de força, o aspecto dessa turbinas está ilustrada na Figura 22.

Figura 22: Rotor Savonius.



Fonte< <http://www.windside.com/fi/yhtio>>

2.3.2 Rotores de eixo horizontal

Rotores de eixo horizontal são os mais utilizados em aerogeradores, devido às suas características que os deixam em vantagem com relação aos rotores de eixo vertical. Tais como: o design das hélices, permite a montagem das lâminas do rotor em torno do eixo longitudinal, possibilitando controle da velocidade do rotor (mesmo havendo grandes variações de vento) e da força gerada, a forma das lâminas também deixa esses rotores altamente eficientes aerodinamicamente, quando submetidos a forças de arrasto na maior angulação possível dessas lâminas, ilustrada na Figura 23.

A constituição desses rotores nas turbinas é baseada nos modelos de moinhos de vento, com três pás/lâminas acopladas ao rotor, já que, são mais estáveis com esse número de pás e menos propensos a turbulências, assim o dano à estrutura é consideravelmente menor.

Figura 23: Rotor eólico de eixo horizontal.



Fonte <<http://energiaeolicabr.blogspot.com.br/2011/12/tipos-de-turbina.html>>

As turbinas eólicas de rotores de eixo horizontal têm duas subdivisões: ‘upwind’ e ‘downwind’.

Os rotores frontais (‘upwind’), no qual o vento age diretamente na região frontal das lâminas do rotor, sendo a orientação de rotor feita por um mecanismo motor e outra

característica são que as pás rígidas. Já os rotores de retaguarda ('downwind'), no qual o vento age diretamente na parte posterior das pás do rotor, e o rotor é auto orientável e com as lâminas flexíveis.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

Estas podem ser classificadas em turbinas de ação e reação.

- **Ação:** operam fora da água turbinada, o rotor se movimenta através da energia cinética provida do fluído. Para tal, necessita-se de equipamentos específicos que transformem a energia potencial do fluído em energia cinética e dirija esses jatos diretamente ao rotor em suas pás. Nas quais as pressões tanto de entrada com a de saída são equivalentes. Exemplo: turbinas Pelton.

- **Reação:** operam imersas na água turbinada. Ocorre penetração do fluído por toda extensão da roda móvel, com eixo de rotação emparelhado a descarga. Em tais a pressão de entrada é superior à de saída. Exemplo: turbinas Francis.

E como as turbinas hidráulicas são amplamente utilizadas nas hidroelétricas, o fluído atua em todas as pás do rotor ao mesmo tempo, o que nos permite classifica-las também em turbinas: axiais, radiais e de escoamento misto.

- **Radial:** no receptor, o fluído atuante está extremamente ao prumo do eixo da turbina.

- **Axial:** turbinas, onde o percurso do fluído ocorre ao redor do eixo da turbina de forma paralela.

- **Escoamento misto:** no receptor, ocorre mudanças das trajetórias do fluído de radial para axial.

3 EQUACIONAMENTOS

3.1 EFICIÊNCIA E RENDIMENTO DAS TURBINAS A VAPOR

Esse cálculo de eficiência dos corpo das turbinas aplica o método da diferença de entalpia, sendo extremamente aplicável para saber o quão limpo é o fluxo do vapor ao decorrer da turbina. A eficiência pode ser definida como a relação entre as entalpias, a entalpia de diferença isotrópica e a diferença de entalpia real do vapor ao longo do interior da turbina de alta pressão. Porém, para a turbina de baixa pressão este método não pode ser utilizado, devido a saída ser vapor úmido. Esta eficiência nas turbinas de alta pressão pode ser expressa por:

$$\eta_{HP} = (D_{hrhp} / D_{hihp}) * 100 \quad (3.1)$$

A diferença real de entalpia ao longo do corpo da turbina de alta pressão, dá-se pela expressão:

$$D_{hrhp} = H_{vap} - H_{erth} \quad (3.1.2)$$

E a diferença isotrópica da entalpia, é expressa por:

$$D_{hihp} = H_{vap} - H_{ith} \quad (3.1.3)$$

Já com relação aos rendimentos, tem-se o rendimento mecânico e o rendimento interno relativo. Respectivamente, o primeiro caracteriza o grau de perfeição da seção do fluxo da turbina, e o segundo, caracteriza o rendimento considerando as perdas mecânicas. O rendimento interno pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\eta_{ri} = W_i / W_o \quad (3.2)$$

E o rendimento mecânico pode ser expresso, deste modo:

$$\eta_m = W_e / W_i \quad (3.3)$$

3.1.2 PERDAS NAS TURBINAS A VAPOR

Tem-se muitas perdas a serem relevadas nas turbinas a vapor, sendo estas perdas:

A) Perda de Fricção do Bico: quando trata-se de uma turbina de impulso é uma perda relevante. Na passagem do vapor ao longo dos bicos, acometesse uma formação de vértices e perda por atrito. Esse atrito é consequência do que ocorre no bocal proveniente do fator de eficiência e também da diferença entre as entalpias.

B) Perda de Fricção na Lâmina: perda acometida em turbinas reação e impulso. Esta perda ocorre quando se tem deslizamento do vapor nas lâminas e gera fricção na lâmina.

C) Perda de fricção da roda: é uma perda gerada pela aparição de uma resistência na roda da turbina, sendo instigado pela passagem do vapor na roda. Perdas de turbina de reação e impulso.

D) Perda devido atrito mecânico: perda que acontece nos rolamentos. Essa perda é causada por atrito entre o rolamento de roda e o eixo e junto também, a válvula reguladora. Para minimizar ao máximo essa perda, basta ter de forma constante a lubrificação das partes móveis da turbina.

E) Perdas decorrentes de vazamento: essas perdas devido a fuga ocorrem de maneira diferente em turbinas de impulso e de reação. Nas de impulso estas são acometidas por fugas nos mancais, diafragmas estacionários, bicos e no eixo. Já na turbinas reação esses vazamentos podem surgir nas pontas da lâmina.

F) Perda de velocidade residual: na conversão da energia cinética contida no vapor na roda da turbina surge essa perda, pois essa admissão do vapor acontece com uma certa velocidade, assim ocorrendo perda de parte dessa energia cinética.

G) Perdas nas válvulas reguladoras: antes da admissão do vapor na turbina em si, este passa pela válvula de regulagem. Esta válvula estrangula o vapor, assim ocorre do vapor ter uma pressão inferior do que a pressão que tinha na saída das caldeiras.

H) Perdas acometidas devido á umidade do vapor: perda proveniente da umidade existente na turbina. Na passagem do vapor pelo estágio inferior da turbina, esse vapor fica úmido, por causa da diferença de velocidade do vapor e da água na hora da mistura, o que não resulta em uma mistura homogênea. E deste modo, com a água tendo que ser 'carregada' pelo vapor, induz perda de parte da energia cinética.

3.1.3 Potência das turbinas a vapor

A potência nas turbinas a vapor podem ser expressas de forma geral, pela quantidade de vapor que flui pela turbina e a diferença de entalpia entre o estágio de entrada e de saída da turbina. Podendo ser expressa por:

$$P = ms * \Delta h \quad (3.4)$$

3.2 EQUAÇÕES DAS TURBINAS A GÁS

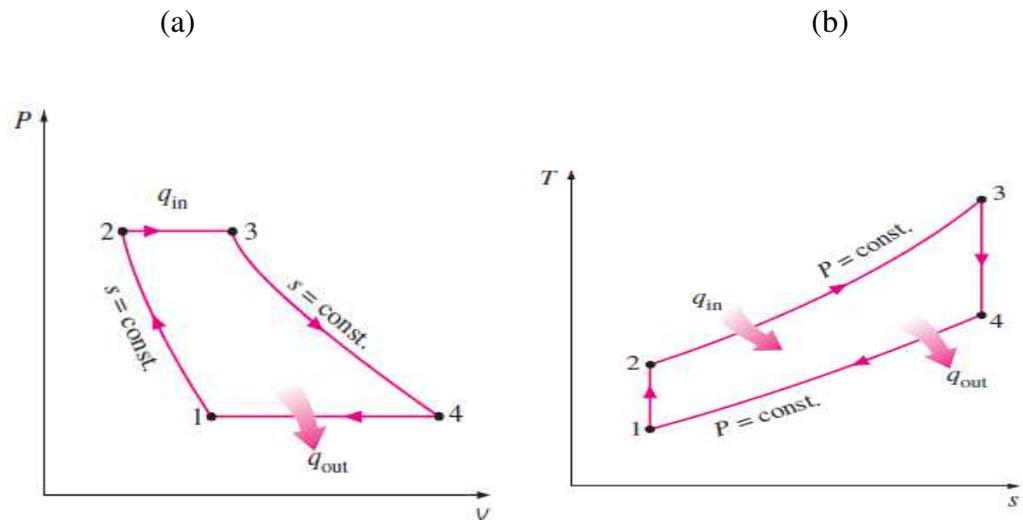
As turbinas a gás operam com um ciclo, o chamado ciclo de Brayton e para poder ter as equações dessas máquinas, basta a compreensão e conhecimento deste ciclo. “O ciclo Brayton foi proposto por George Brayton, para ser utilizado no motor alternativo desenvolvido por ele em 1870. Hoje, é apenas usado em turbinas a gás, nas quais os processos de compressão e expansão ocorrem em um maquinário rotativo[...]” (ÇENGEL: BOLES, 2006, p.507).

Este ciclo pode ser separado em outros dois ciclos: ciclo real e ciclo ideal. No ciclo ideal é desconsiderado todas as possíveis perdas, assim imaginando um ar padrão escoante sem a ação de irreversibilidades. Tal ciclo se inicia quando se tem a admissão do ar, que no compressor, sofre compressão isentrópica e adiabática e junto com esses processos também tendo aumento de temperatura. Logo após a saída do compressor, o ar tem passagem na câmara de combustão, onde misturado ao fluído combustível será queimado. Na saída desses gases gerados da câmara, durante a ação destes nas turbinas são acometidos por uma expansão isentrópica. E o fluído atuante nas pás, com essa movimentação provêm a redução da temperatura e da pressão até a condição ambiente. De tal forma, este ciclo tem classificação como aberto, pois o gases expelidos não são reutilizados.

No entanto, no ciclo real, denominado ciclo fechado, alguns processos como a expansão e a compressão continuam equivalentes aos do ciclo aberto. Mas, sem câmara de combustão, tem sua alteração por um trocador de calor operante por intermédio de fonte exterior, e a exaustão é deletada, por um processo de rejeição de calor, que possibilita ao reuso deste ar no ciclo.

O ciclo ideal pode ter representação realizada pelo uso de gráficos, conforme ilustrado nas Figuras 24(a) e 24(b).

Figura 24:



Fonte: <Laurya, L.M. Análise de rendimento de uma turbina a gás utilizando resfriamento do ar de aspiração. Pdf>

As figuras 24-a e 24-b podem ser compreendidas ou interpretadas respectivamente como: trabalho líquido produzido e calor líquido absorvido. Se o intuito é a obtenção do equacionamento do trabalho, primeiramente tem-se a necessidade da efetuação de um balanço energético para este escoamento imutável.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad (3.5)$$

O fluido de trabalho tem uma quantidade de calor transferida e rejeitada pelo mesmo, o ar, expresso por:

$$Q_{entra} = h_3 - h_2 = c_p * (T_3 - T_2) \quad (3.6)$$

$$Q_{sai} = h_4 - h_1 = c_p * (T_4 - T_1) \quad (3.7)$$

E o trabalho realizado pela turbina por unidade de massa, é expresso pela equação:

$$W_t = (h_3 - h_4) * m_{ar} \quad (3.8)$$

E o trabalho realizado pelo compressor pela mesma unidade de massa:

$$W_c = (h_2 - h_1) * m_{ar} \quad (3.9)$$

Na análise do ciclo tem embasamento no ar padrão frio, considera-se o calor específico permanente. Assim a eficiência térmica deste ciclo, pode ser enumerada por:

$$\eta_t = W_{liq} / Q_{entra} \quad (3.10)$$

E com relação ao rendimento isentrópico do compressor e da turbina, podem ser obtido estes valores, pelo uso da expressão que aplica a relação de compressão, que comumente é um dado fornecido nos catálogos. Então as expressões são:

$$\eta_{compressor} = 1 - (0,04 - R_p - 1 / 150) \quad (3.11)$$

$$\eta_{turbina} = 1 - (0,03 - R_p - 1 / 180) \quad (3.12)$$

3.2.1 PERDAS NAS TURBINAS A GÁS

Essas turbinas podem ter perdas causadas por deterioração ou perdas aerodinâmicas, respectivamente podem ser subdivididas em: perdas recuperáveis e perdas não recuperáveis, perdas de perfil e perdas secundárias.

A) Perdas por degradação:

- Perdas recuperáveis: perdas comumente interligadas a incrustação que pode ocorrer no compressor. Podendo haver solução de forma mais simples por lavagem com água que reduz o problema e não o elimina, ou uma solução eficaz, executando limpeza mecânica das palhetas e das pás do compressor, quando haja abertura da turbina, seja pra checagem ou manutenção.

- Perdas não recuperáveis: associada a folga no compressor e na turbina, e também, alterações decorridas na superfície exterior do componente e no entorno do aerofólio, o que induz numa perda de eficiência desses elementos. Qualquer procedimento, limpeza ou manutenção não é suficiente, então, para arrumar essa perda somente com troca dos equipamentos afetados durante manutenções ou inspeções. E para a obtenção de valor exato ou conclusivo dessas perdas não há possibilidades, pois podem ser causadas pelo modo como atua a turbina, pela umidade, pelo combustível, por contaminantes existentes no ar admitido na turbina ou pela quantidade de diluentes injetados que influenciam no número de oxidação.

B) Perdas aerodinâmicas: característica do fluxo, complexas, que reduzem a eficiência da turbina. Esta redução é acometida entropia criada por mecanismos, a partir destes processos dinâmicos dos fluídos, como fricção viscosa nas camadas de cisalhamento livre ou camadas limite, troca de temperatura entre os fluídos e processos desequilibrados como expansões ligeiras. Sendo essas perdas denominadas de perdas terminais, subdivididas em:

- Perdas de perfil: perdas decorrentes distante das terminações, produzida na lâmina de camada limite graças ao atrito da área de contato da lâmina. E as perdas de perfil também incluem as perdas nas bordas, as perdas pela separação de camadas limitadoras da lâmina e fricção na camada limite da superfície da lâmina.

- Perdas secundárias: perdas ocorridas na parede do anel longe da atuação das lâminas. Uma das perdas mais cruciais de ser ter conhecimento da sua ocorrência em uma turbina, já que normalmente acredita-se que sua contribuição para as perdas totais beira um terço. Porém essa perda é difícil de quantificar e descrever.

3.3 EQUAÇÕES DAS TURBINAS EÓLICAS

3.3.1 TORQUE

Quando ocorre a extração do vento por uma turbina eólica de maneira mecânica, essa passa/transfere ao eixo rotativo da turbina esta energia. Para uma transmissão eficiente e correta da energia os eixos devem ser projetados devidamente. A atuação do torque no eixo produz pressão ao material do eixo ou acomete forças internas. Quando está ocorrendo a transferência de potência ao longo do eixo, um torque T é gerado. Este é dado por:

$$T = P/\omega t \quad (3.13)$$

Sendo o coeficiente de torque C_t definido por:

$$C_t = C_p / \lambda \quad (3.14)$$

Da equação anterior e realizando $r=D/2$, obtemos: $TSR = \lambda = u/v = (\omega t r) / v = (\omega t D) / 2v$. Então:

$$\omega t = (2v\lambda)/D \quad (3.15)$$

A potência extraída ($P=P_{ext}$) de uma turbina é:

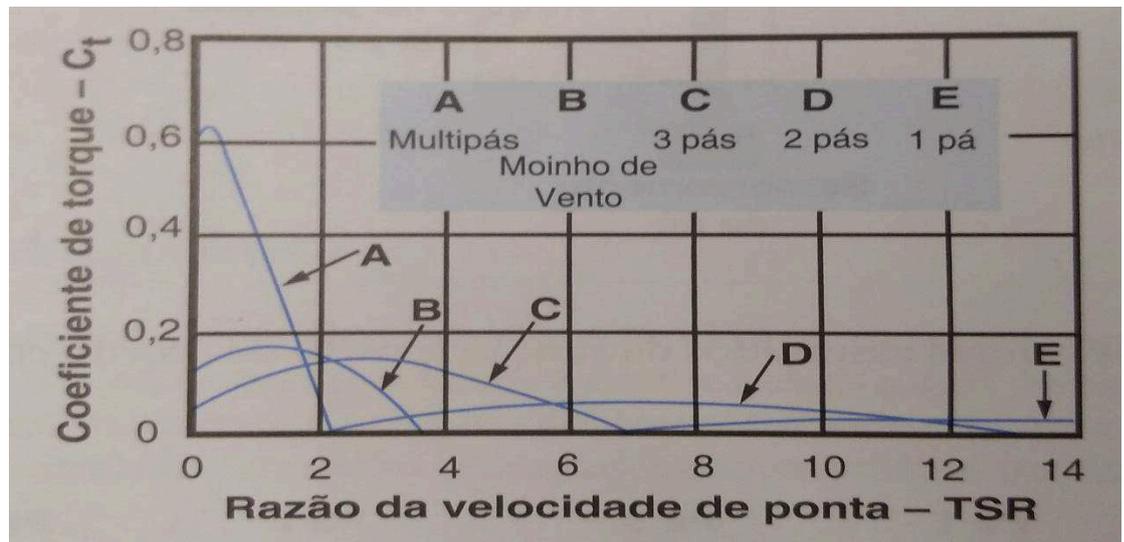
$$P = (1/2) * C_p * \rho * A v^3 \quad (3.16)$$

Substituindo (3.16) e (3.15) em (3.13) , obtemos:

$$T = C_t / 2 (\rho A v^2 D) / 2 \quad (3.17)$$

Ao analisa-se as Equações (3.17), nota-se que o torque varia com relação ao quadrado da velocidade v e que a potência, varia com o cubo da velocidade do vento v^3 . A Figura 25 destaca a variação do Torque contra a TSR.

Figura 25: Coeficientes de torque diferentes de rotores com eixo horizontal.



Fonte: Pinto, Milton. LTC. Fundamentos de energia eólica. 1ª edição, 2017.

Pela análise do gráfico da Figura 25, verifica-se as turbinas de três, duas e de uma pá apresentando um grande valor ao C_p , no entanto, também vendo as indicações da curva de torque de que máquinas velozes tendem a ter um baixo valor de torque de inicial. Assim podemos constatar o porquê de nos dias atuais o uso de rotores de três pás ser o mais comum, já que os rotores de uma ou duas pás, são mais susceptíveis a problemas com se tem variações de ruído e torque.

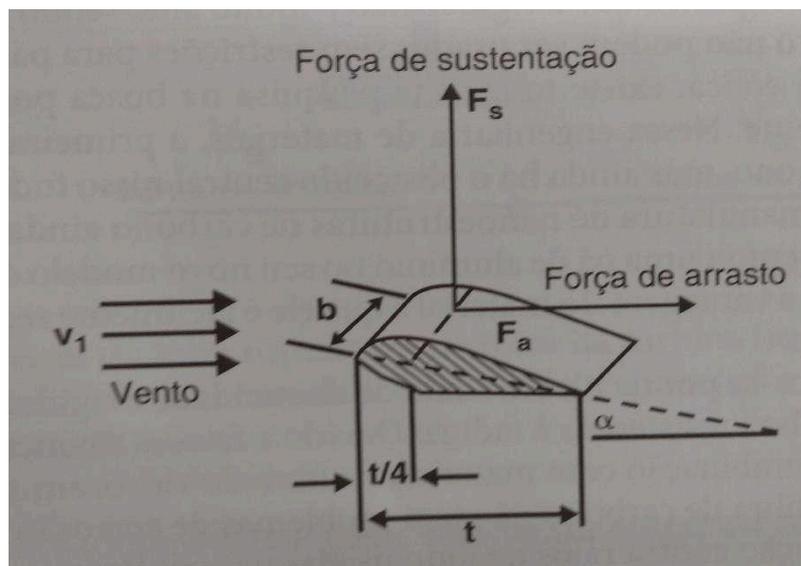
3.3.2 Forças de arrasto e de sustentação

A força de arrasto trata do movimento de um objeto ou corpo em um fluido (água, ar, entre outros), no caso das turbinas eólicas, vemos que o ar exerce um certo tipo força de resistência no objeto, que seria as pás dos rotores eólicos, e essa atuação do vento nas pás pode gerar uma redução de velocidade.

A força de sustentação é a diferença de pressão entre a parte superior e inferior de um objeto, a ser submetido pela ação de um fluido. Então a consideração das espessuras das pás devem ser relevantes, pois uma menor espessura pode receber uma atuação do vento mais forte, tendo assim uma velocidade mais elevada, isso também ficaria bem evidente em uma pá que tenha duas espessuras divergentes em sua composição, assim parte da pá mais espessa estaria rotacionando em uma velocidade mais lenta, enquanto a parte menos espessa em velocidade mais ampliada.

Esta forças consistem nas primordiais propriedades de um rotor segundo a teoria dos aerofólios. Considerando um determinado elemento que tenha uma profundidade(t) e um comprimento (b) está predisposto a velocidade do vento(v_1), onde (ρ) é a densidade do ar. Como demonstrado na Figura 26.

Figura 26: Força de arrasto (F_a) e sustentação (F_s) de uma pá.



Fonte: Pinto, Milton. LTC. Fundamentos de energia eólica. 1ª edição, 2017.

As forças de arrasto e sustentação também dependem do ângulo de ação (α) entre o perfil de pá e a direção do vento, a força de arrasto (F_a) e a força de sustentação (F_s) podem ser expressas por:

$$F_s = C_s \alpha \left(\frac{\rho}{2}\right) v_1^2 t_b \quad , \text{ perpendicular ao fluxo incidente} \quad (3.17)$$

$$F_a = C_a \alpha \left(\frac{\rho}{2}\right) v_1^2 t_b \quad , \text{ na direção do fluxo incidente} \quad (3.18)$$

Sendo as características de perfil da pá dependentes da ação da incidência do ângulo (α), representadas pelos coeficientes C_s e C_a . A analogia entre a força de arrasto e sustentação (C_s/C_a) também é denominada de taxa de deslizamento.

3.3.3 Eficiência energética de uma turbina eólica

Para a obtenção de um limite máximo de transformação de uma energia em outra, alguns processos, tecnologias usufruem de ressalvas. Tem-se a possibilidade de transferência de calor entre uma fonte gélida para uma fonte aquecida, isto, levando em conta as restrições das leis da termodinâmica, a se considerar a proibição de destruição de energia da primeira lei e a limitação da disposição e modos de transformação da segunda lei. Contudo, se realiza um trabalho, produção de energia que pode ser limitada pelo ciclo de Carnot*, que descreve:

$$e = 1 - (T_{\text{frio}} / T_{\text{quente}}) \quad (3.19)$$

Sendo que a eficiência dificilmente será equivalente a 1, pois isso só ocorreria se T_{frio} for igual ao zero absoluto. (* Nicolas Léonard Sadi Carnot foi um matemático, engenheiro e físico francês que realizou sobre as máquinas térmicas o primeiro esquema teórico que obteve sucesso, o ciclo de Carnot, que demonstrou as considerações fundamentais encontradas na segunda Lei da Termodinâmica.)

3.3.4 Limite de Betz

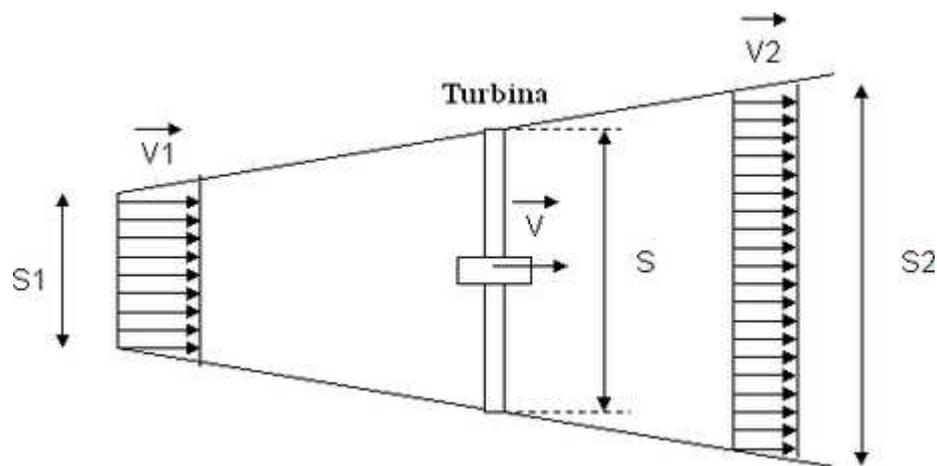
Em prática quando se obtêm uma grande quantidade de energia cinética retirada dos ventos pela aerogerador, equivalente será a retenção do ar pelo mesmo. Caso de

forma teórica fosse realmente possível uma extração completa da energia do vento, haveria dois impasses, no primeiro o ar ao sair teria velocidade nula, assim nem sequer o ar conseguiria passar pelo aerogerador após a extração, impossibilitando a passagem de ar pelo rotor que resulta na incapacidade de extração energética. No segundo impasse, supondo que o ar passe sem nenhum impedimento pelo tubo de vento, também seria inviável a extração de energia.

Entre estes impasses, existe uma região onde segundo a Lei de Betz, onde tem-se um valor mais eficiente para a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica. Essa Lei diz os melhores aproveitamos teóricos capazes de se obter de um aerogerador num escoamento contínuo nunca chegaria a um valor excedente de 59%, demonstrando que o coeficiente máximo de potência é de 0,59. Esta Lei pode ser estabelecida a partir da Figura 27.

Claro, este valor seria no caso de rotor ideal idealizado e construído para operar de maneira em que a velocidade do vento no rotor seja $2/3$ da velocidade do vento no seu livre percurso e parte dessa energia aproximadamente $8/9$ seria desperdiçada por meio de uma velocidade de esteira divergente de zero, a produto de ambos os fatores tem-se o coeficiente máximo teórico.

Figura 27: Representação esquemática da Lei de Betz



Fonte: <<https://microeolica.weebly.com/limite-de-betz.html>>

Na figura da representação da lei de Betz, temos: V_1 = velocidade dos ventos antes das pás de uma turbina; V_2 = velocidade do vento após a turbina; V = velocidade do vento nas pás da turbina; S_1 = seção do tubo antes da turbina; S_2 = seção do tubo depois da turbina; S = seção da turbina.

Atualmente nenhuma turbina eólica moderna foi capaz de alcançar o limite de Betz, atingido um valor máximo de eficiência de 0,47. Sendo que devemos relevar que podem haver efeitos que acabem reduzindo o coeficiente máximo de potência, podendo ser: surgimento de forças de resistência aerodinâmica, possível perda nas pontas das pás em conjunto com número finito das mesmas e a rotação na esteira a jusante do rotor.

3.3.5 Potência em turbinas eólicas

O valor total da potência que se pode ter no vento e ser transformada em energia mecânica por uma turbina eólica, denomina-se coeficiente de potência (C_p), aplicado de forma mais comum na comparação de eficiência de diferentes turbinas eólicas.

A energia que o vento repassa ou transfere ao rotor, depende de vários fatores como: do deslocamento de uma massa de ar (m) a uma velocidade (v_1), da área de ação do rotor (A) e da densidade do ar (ρ), sendo demonstrado pela equação:

$$P_v = 1/2 * \Delta m / \Delta t * v_1^2 \quad (3.20)$$

Tendo t como representação do tempo e considerando que o rotor pode ter um fluxo de massa de ar atravessando suas pás, que é definido por:

$$\Delta m / \Delta t = \rho * A * v_1 \quad (3.21)$$

Realizando a substituição da equação (3.21) em (3.20), veremos que a potência no vento sofre variação com o cubo da velocidade, essa potência mecânica disponível, é obtida por:

$$P_v = 1/2 * \rho * A * v_1^3 \quad (3.22)$$

O aproveitamento eólico é diretamente influenciado pela capacidade de ventos do local, já que valores de velocidade de vento elevados, aumentariam de forma considerável a potência. Entretanto, o aerogerador é incapaz de aproveitar a totalidade da potência disponível nos ventos, sendo apenas uma pequena parte convertida pelo rotor em energia mecânica.

O coeficiente de potência das turbinas eólicas tem uma medida adimensional e enaltece a capacidade do nível de rendimento da turbina, sendo expresso por:

$$C_p = P_t / P_v \quad (3.23)$$

Sendo que a potência teórica extraída da turbina, definida pela quarta parte do fluxo de ar atuante tanto antes da passagem pelo rotor, como depois da passagem pelo mesmo, considerando também as diferentes velocidades, sendo (v_3) velocidade do vento após a passagem pelo rotor. Então a expressão da potência teórica é definida por:

$$P_t = 1/4 * \rho * A * (v_1 + v_3) * (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.24)$$

3.4 EQUACIONAMENTOS DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

3.4.1 POTÊNCIA

No caso das turbinas hidráulicas quando se opta por um determinado tipo, tem-se algumas características que já se conhece, como vazão, as rotações por minuto e a altura de queda. Tendo esses dados, com o acréscimo dos valores de rendimento estimativos, possibilita o cálculo da potência mecânica por meio da equação definida por:

$$P_{mec} = 9,8 * \eta_t * \eta_h * Q * H_{top} \quad (3.25)$$

E a potência que é admitida na entrada da turbina, a potência mecânico-hidráulica, pode ser definida por:

$$P_h = \gamma * Q * H_d \quad (3.26)$$

$$P_h = (1000 / 75) * Q * H_d \quad (3.26a)$$

E a potência de saída da turbina que é equivalente a potência mecânica útil disponível no eixo do gerador, dada pela expressão:

$$P_{mu} = (1000 / 75) * Q * H_d * \eta_t \quad (3.27)$$

Entretanto como pode haver perdas, sejam essas hidráulicas, mecânicas ou volumétricas, nem toda a energia entregue ou concedida ao fluido por ser convertida em trabalho, então utiliza-se a potência eficaz para expressar a potência recebida pelo fluido mais a soma das potências que se perdem no processo, sendo dada por:

$$P_{ef} = P_i - P_{pm} \quad (3.28)$$

E as perdas internas, são expressas pela seguinte equação:

$$P_i = \gamma * Q_t * H_t \quad (3.29)$$

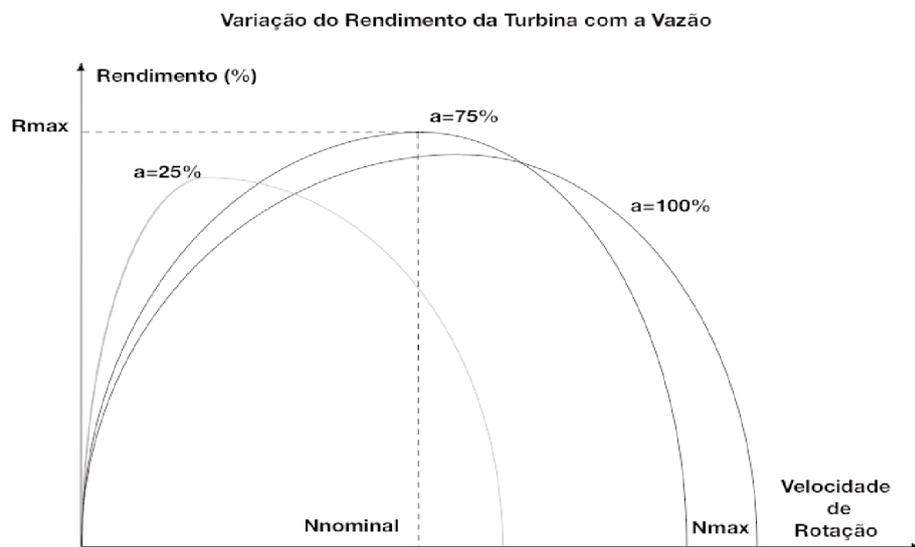
3.4.2 Rendimento das turbinas hidráulicas

Estas turbinas são projetadas para ter o rendimento com base nas grandezas conhecidas como velocidade de rotação, queda e vazão, assim possibilitando determinar um rendimento máximo, expresso por:

$$\eta_t = P_m / Q_t * H_t \quad (3.30)$$

As turbinas hidráulicas apresentam curvas características que incluem o rendimento, sem poderem ter valor expresso de forma teórica. Nessas turbinas, válvulas de controle regulam a vazão, e a vazão e a velocidade rotacional são os elementos que influenciam no rendimento, de acordo com a Figura 28.

Figura 28: Variação do rendimento em função da abertura da velocidade



Fonte: <http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/turb_hidro.php>

Contudo, cada equipamento deve possuir ou ter medido experimentalmente sua curva característica, obtendo um desenvolvimento mais barato e podendo também ter modelos em escala reduzida com a aplicação das curvas.

3.4.3 Perdas das turbinas hidráulicas

As perdas podem ser mecânicas, volumétricas e hidráulicas.

A) Perdas Hidráulicas: são as perdas decorrentes no interior das turbinas e estas perdas são as mais relevantes. E podem ser acometidas por:

- um atrito ocorrido no contato da superfície do fluído e das paredes dos maquinários;

- formato interno de componentes como aletas e pás influenciando numa alteração da camada limite;

- na ocorrência de mudança severa na direção ou seção dos canais que guiam o fluído pelo equipamento, gerando uma perda de energia;

- durante a operação do equipamento fora do ponto de projeto, que é acometido pelo embate da água contra o bordo de atuação das pás.

Tais perdas são inclusas no cálculo das alturas de queda, tendo a expressão:

$$H_t = H - J_h \quad (3.31)$$

B) Perdas volumétricas: perdas acometidas pelo escape do fluído entre o eixo e a carcaça, nos labirintos das turbomáquinas e entre a carcaça e o rotor. Sendo estes labirintos, as lacunas que se tem entre carcaça/eixo e carcaça/rotor da turbina, e os labirintos possuem como função a redução de escape do fluído e inibir o contato dessa partes. Estes são constituídos por um conjunto de anéis, que podem ser desgaste e mesmo assim serem reutilizados, instalados em partes sólidas do rotor ou da turbina, ou nos dois. Os anéis possibilitam redução da folga ou troca quando já estão desgastados, de forma a não impactar as partes móveis ou fixas da turbina ou da máquina.

Assim podemos expressar a vazão que passa por permutas de energia e pelo próprio rotor, pela equação:

$$Q_t = Q - q_i \quad (3.32)$$

C) Perdas Mecânicas: perdas externas e expressam especialmente por volantes de inércia, ou perdas por atrito em gaxetas, mancais e atrito de ar nas conexões. Ainda para equipamentos como turbinas, também leva-se em conta as perdas geradas no regulador de velocidade decorrido do seu consumo de energia.

Sendo essas perdas mecânicas difíceis de se mensurar, para se aproximar de um valor aceitável, aplica o conceito do rendimento mecânico:

$$\eta_m = P_{ef} / P_i \quad (3.33)$$

4 APLICAÇÃO DAS TURBINAS

4.1 TURBINAS A VAPOR NAS CENTRAIS A VAPOR

4.1.1 Central termoeétrica

As termoeétricas são grandes instalações industriais para produção de eletricidade através da energia expelida em formato de calor proveniente da queima de algum combustível, seja este renovável ou não-renovável.

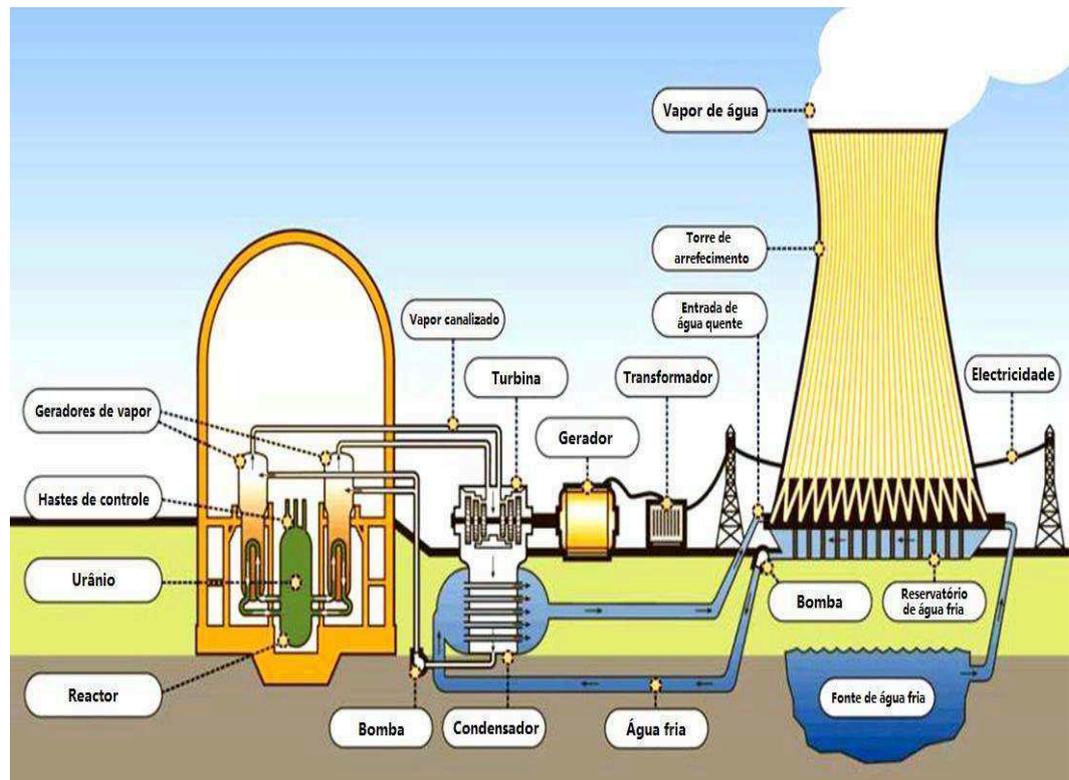
Estas centrais funcionam normalmente com o ciclo das turbinas a vapor, o ciclo de rankine. Sendo composta por cinco equipamentos fundamentais para a sua operação, sendo eles: o gerador, a turbina, a caldeira e uma torre de refrigeração ou um circuito de arrefecimento vindo de rios ou do mar. Tendo em vista a importância da caldeira nessas instalações, pois nesse equipamento ocorre a produção de todo vapor que se faz suficiente para a movimentação do rotor elétrico do gerador. Esse vapor gerado contém uma elevada pressão a qual é utilizada pela turbina para a conversão da energia contida no vapor em energia mecânica.

Nas termoeétricas a diferenciação das centrais, tipicamente é realizada por intermédio do tipo de combustível ao qual se efetua a queima, petróleo, carvão ou gás natural, ocorrendo também a queima mista em algumas localidades.

4.1.2 Central Nuclear

Uma usina nuclear opera gerando eletricidade por meio da utilização de energia nuclear, a qual usa-se componentes radioativos como o urânio, e quando o mesmo componente é submetido a uma reação, esta gera calor. Estas centrais operam produzindo energia a partir do método da fissão nuclear, que trata do rompimento de átomos maiores em menores, essa quebra gera energia térmica, que por sua vez aumentando a pressão do gás é aplicada no funcionamento das turbinas a vapor que estão interligadas ao gerador elétrico. A Figura 29 ilustra o aspecto de uma central nuclear.

Figura 29: Esquema de componentes de uma usina nuclear.



Fonte: <<https://rd9centralelectrica.webnode.pt/desenvolvimento/centrais-nucleares/como-funciona-uma-central-nuclear-/>>

As centrais nucleares são classificadas de acordo com o reator com o qual essas operam, porém todas mantêm um funcionamento equivalente da utilização da fissão. Sendo os tipos de centrais nucleares:

A) Reatores de água natural (LWR): trabalham com o urânio enriquecido, e se subdividem em PWR e BWR.

- BWR (Reator de água ebuliente): operam com um ciclo mais direto, onde o vapor produzido no reator por consequência da ação do urânio atua acionando a turbina.

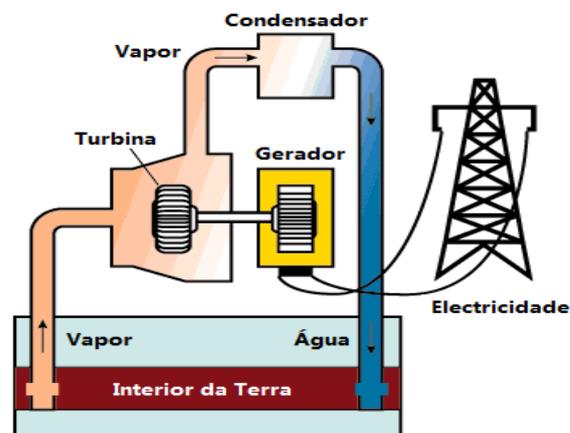
- PWR (Reator de água pressurizada): operam com o ciclo indireto, consiste na água em estado líquido que se encontra na cuba do reator se movimentando no circuito primário, diferentemente da onde circula a mesma após vaporização atravessando a turbina o chamado circuito secundário. Então por meio de um gerador de vapor, ocorre troca térmica entre a água do primário e do secundário, ocasionando na produção de vapor.

B) Reatores de água pesada: trabalham com urânio no estado natural. - HWR (Reator de água pesada): também atuam com o ciclo indireto. O vapor é gerado por meio da troca de energia da água do circuito da turbina e da água pesada que se encontra no circuito primário.

4.1.3 Central Geotérmica

Essas instalações usufruem do calor que as rochas localizadas no interior da Terra, aplicam sobre alguns reservatórios de água subterrâneos, o que em si, acaba deixando a água com temperatura elevada. Para a aplicação abrem-se buracos imensos para alcançar tais reservatórios de vapor e água, e a instalação dos equipamentos seja canos e tubos deve ser feita de forma adequada, para que esse vapor possa ser guiado até a central. Então o vapor pressurizado é guiado para as pás da turbina. Assim toda a energia mecânica produzida pela turbina é convertida pelo gerador em eletricidade, esta passa por um transformador para elevação da energia elétrica, por fim sendo distribuída a rede. Depois de todo esse processo, ao final da sua utilização na turbina, o vapor é transportado para um tanque, com o intuito de que ocorra uma condensação, graças ao procedimento de resfriamento. Novamente a água é transportada ao reservatório subterrâneo, onde sofrerá mais uma vez a atuação das rochas quentes, sendo reaquecida para uso posteriormente. A Figura 30 ilustra o aspecto de uma central geotérmica.

Figura 30: Esquema de uma central geotérmica



Fonte: <<https://rd9centralelectrica.webnode.pt/desenvolvimento/centrais-geotermicas/como-funciona-uma-central-geotermica/>>

4.2 APLICAÇÃO DAS TURBINAS A GÁS

4.2.1 TERMOELÉTRICAS

Nas termelétricas a aplicação das turbinas a gás ocorre quando o processo de combustão é interno. Este gera um fluido que é um produto composto originado da mescla de combustível e ar, processo que comumente é acometido em turbinas a gás. E como a tecnologia dessa turbinas é recente, tem-se alguns impasses e dificuldades tecnológicas que podem acontecer nas centrais a gás.

Dentre estes problemas tecnológicos, o principal é que para se obter um rendimento aceitável tem a necessidade de gerar altas temperaturas para que o rendimento ocorra de forma aceitável, outro problema para se enumerar, está no fato dos múltiplos estágios que interferem no turbo compressor indagando numa ocorrência de limitação de potência.

E o funcionamento pode ser explicado de maneira simplória, a expansão dos gases queimados faz o acionamento da turbina a gás que está acoplada ao gerador, dessa maneira a energia mecânica é convertida em eletricidade.

4.2.2 Sistema de propulsão marítima a gás (COGOG)

No COGOG, as turbinas a gás são empregadas no motores de navios de guerra. Para poder enumerar as vantagens da utilização dessa turbina, basta equiparar tal com motores a diesel de combustão interna, nesses motores todo o ciclo (combustão, compressão e expansão) acontecem dentro de um mesmo componente o qual é o cilindro, assim o impulso atuante no motor ocorre de forma intermitente num ciclo constante e repetitivo. Porém nas turbinas a gás, a compressão acometesse num parte distinta da unidade, depois a massa de ar sobrevém no queimador, onde está mescla-se com o combustível e a expansão é realizada seja por uma ou mais turbinas, no final uma quantidade da energia produzida é transformada em potência útil, e essa potência é usufruída no eixo, continuamente.

4.2.3 Aeronáutica

A utilização das turbinas a gás ocorre devido a principal característica desse equipamento é o valor elevado da densidade de potência, assim, quando equiparadas com outros componentes, produzem potências elevadas diferentemente das máquinas de tamanho equivalente, com o acréscimo de ter um peso mais leve, o que em aeronaves possibilita uma maior eficácia e disposição de carga.

Essas turbinas aplicadas na aeronáutica podem ter várias configurações, as mais aplicadas são as turbofans, turbohélices e turbojato. Nas turbohélices a transformação térmica do gás é repassada em energia mecânica ao eixo. O qual está fixado numa caixa de engrenagens, que efetua a redução da rotação para um eixo que tem uma hélice acoplada. A propulsão ocorre pela hélice que está fixada no eixo redutor, e não pelos gases de escape e estas turbinas são confeccionadas para voos subsônicos.

Nas turbofans, tem em sua composição uma grande quantidade de pás que formam um conjunto, este admite o ar para o interior do equipamento, nesse caso a turbina. A maioria do ar admitido passa pela parte externa do motor, e este não passa por baixa compressão ou é comprimido. Esse ar possibilita a aeronave operar em baixas velocidades sem acréscimo no consumo dos combustíveis, isso pelo empuxo mais eficaz que é fornecido pelas turbinas. Grande parte das aeronaves tem aplicadas essas turbinas.

E nas turbojato, o ar sugado sofre compressão de três a doze vezes por meio de um compressor axial ou centrífugo. Após ser comprimido, esse ar é misturado ao combustível e depois incinerado, sendo expandido em velocidades elevadas na passagem pela turbina, que faz conversão da energia cinética em trabalho.

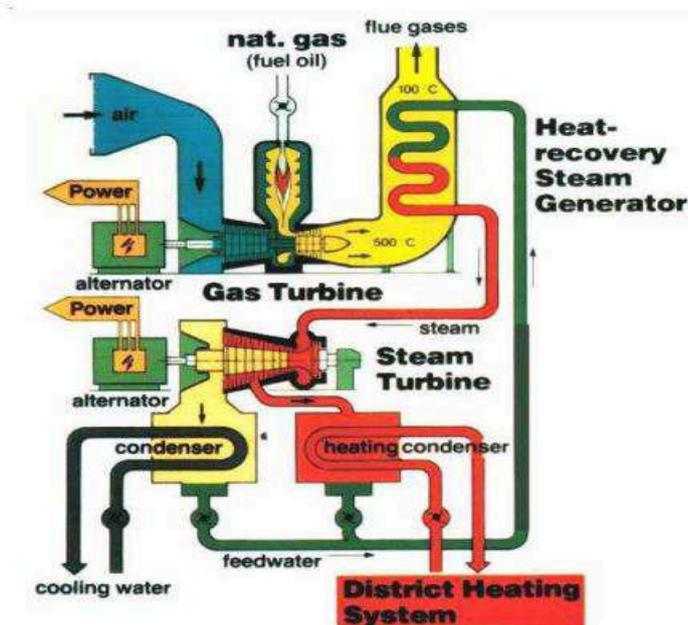
Essas turbinas ainda podem ser utilizadas com um pós-queimador ('afterburner') para ampliar o empuxo produzido. Este equipamento tem como característica principal, por meio de uma segunda combustão aumentar a temperatura do ar expandido, isso pela aplicação de combustível nos gases expandidos, e por uma faísca, iniciar a nova combustão. E o bocal de saída por ter uma área constante e conhecida, permite os gases saírem com uma velocidade ampliada, o que efetua o aumento do empuxo.

4.2.4 Ciclo combinado

O ciclo combinado ilustrado na Figura 31, é usado em termelétricas com o intuito de produção de energia elétrica. Sendo essa produção um de associação de operação de uma turbina a gás, que tem acionamento provido pela queima de combustíveis e uma turbina a vapor ambas acopladas cada uma a um gerador elétrico. Os gases que escapam por possuírem uma elevada temperatura, fazem a conversão da água em vapor, esse vapor aciona a turbina vapor. O funcionamento dessas instalações com ciclo combinado acontece da seguinte maneira, a queima de combustível gera gases que geram o funcionamento das turbinas a gás, que como estão acopladas ao gerador, possibilitam a transformação de energia mecânica em elétrica. E os gases resultantes no processo das turbinas a gás, tem seu reaproveitamento pela caldeira de recuperação de calor, sendo utilizado no momento da conversão de água em vapor, para fazer operar a turbina a vapor.

Esse tipo de operação tem eficiência já que usufrui dos ciclos termodinâmicos. A combinação do ciclo Brayton com o ciclo Rankine induz um aumento relevante do rendimento, tendo uma capacidade de beirar os sessenta por cento, um valor pouco melhor, do que o rendimento de cada turbina operando de forma separada.

Figura 31: Esquema de uma central termoeletrica de ciclo combinado



4.3 UTILIZAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS

4.3.1 SISTEMAS EÓLICOS

As turbinas eólicas pode ser utilizadas em sistemas de três maneiras diferentes: sistemas híbridos, sistemas interligados a rede e sistemas isolados. Tais sistemas tem uma base de configuração equivalente para ambos, precisando de uma unidade para controlar a potência, e em outros casos, também havendo necessidade de uma unidade regulando o armazenamento.

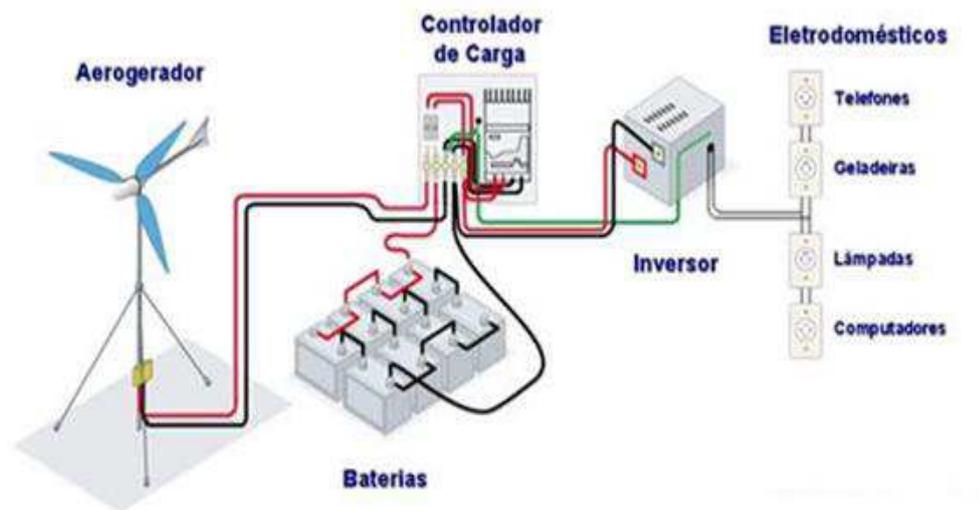
4.3.1.1 Sistemas Isolados

Os sistemas isolados em si quase sempre possuem alguma maneira de armazenar a energia. Esta estocagem de energia possui duas maneiras de ser realizada, primeiro com o intuito de ativar aparelhos elétricos, estocando essa energia em baterias para uso posterior, ou armazenar energia na forma gravitacional, guardando água bombeada em reservatórios. Em alguns casos, como em sistemas de irrigação, toda a água que foi bombeada de maneira mais direta já é usufruída. Este sistema possui o aspecto ilustrado na Figura 32.

Nos sistemas que operam com baterias para o armazenamento, há necessidade de um equipamento auxiliar para controle das descargas e cargas da bateria, cujo qual tem o nome de controlador de carga. Este tem como enfoque de função principal, inibir possíveis danos a bateria causados por descarga ou sobrecarga profunda.

Nestes sistemas a utilização de inversores ocorre quando surge equipamentos que precisem de alimentação de corrente alternada. Tal equipamento comumente inclui um seguidor do ponto máximo da potência, o suficiente para a otimização da mesma. Este é um sistema que geralmente é empregado quando pretende-se utilizar eletrodomésticos.

Figura 32: Composição de um sistema isolado



Fonte: CRESESB, 2005.

4.3.1.2 Sistemas Híbridos

Estes sistemas não são acoplados nas redes convencionais, e possuem várias possibilidades de fontes para geração da energia, podendo ser utilizado sistemas fotovoltaicos, geração por diesel, turbinas eólicas, dentre outros. De certo modo essa vantagem de aplicar diversas fontes para geração, também é uma desvantagem, já que, surge uma complexidade maior no sistema em si, fora a necessidade de regulagem ou otimização na hora de aplicação de cada fonte. Nesses sistemas, o controle tem de ser feito de tal maneira a assegurar uma eficácia máxima na energia provida ao usuário (nesse caso trata-se do consumidor).

Estes sistemas ilustrados na Figura 33, são empregados para atender grande quantidade de consumidores tipicamente em instalações de grande e médio portes. Como opera com corrente alternada, neste sistema também aplica-se um inversor. E para utilização de forma mais coerente da otimização do sistema, carecido da alta complexidade das ligações e arranjos, deve ser efetuado um estudo adequado a cada sistema.

Figura 33: Composição de um sistema híbrido com eólica, solar e geração a diesel



Fonte: CRESESB, 2005.

4.3.1.3 Sistemas interligados a rede

Nos sistemas interligados como há utilização de uma grande quantidade de aerogeradores, torna-se desprezível a necessidade de armazenamento de energia, já que efetivamente tudo que é gerado é devolvido de forma direta a rede, de acordo com a Figura 34.

Esse tipo de sistema ainda é o mais utilizado, temos como exemplo no Brasil, o parque eólico da Prainha, que se encontra no município de Aquiraz no estado cearense, com um potência máxima implementada de 10Mw (Megawatts), sendo um total de 20 turbinas eólicas, com cada uma tendo 0,5 Mw de potência.

Figura 34: Parque eólico da Prainha-CE, parque eólico interligado a rede



Fonte:< <http://www.deolhoemaquiraz.com.br/2015/12/empresa-cearense-compra-parque-eolico.html>>

4.3.1.3.1 Sistemas offshore

Esses sistemas vem se tornando a nova forma de utilização da fonte eólica, pois devido ao fato de que com o decorrer do tempo acaba se esvaindo o espaço terrestre para aplicação das turbinas eólicas. Assim mesmo essa aplicação sendo feita nos mares, o que gera uma desvantagem de altos custos, seja manutenção, instalação e claro também no transporte, vem se estudando a implementação desse sistema. Entretanto com a instalação nos mares, possibilita-se uma dimensão maior das turbinas e ventos com velocidades maiores, comumente as offshore geram mais energia que as onshore.

Contudo o desenvolvimento desses sistemas ocorre quando a propiciada condição marítima, para um transporte efetivo e seguro, e também instalação adequada para após uma utilização efetiva. De tal modo para realização dos mesmos, sempre terá a necessidade do estudo das condições e de como será feito toda a parte operacional do sistema.

Esses parques eólicos offshore ocorrem com uma incidência maior na Europa, onde se tem uma busca por novas fontes e se consideramos de certo modo, alguns

países menores tem um restrito espaço terrestre para aplicações de usinas. Um bom exemplo de parque offshore ocorre em Middelgrunden, na Dinamarca, que se encontra próximo ao porto de Copenhague. Sendo um parque com 20 turbinas eólicas de capacidade de 2MW (Megawatts), dispostas de maneira a formar um arco. Com uma capacidade de produzir 90Twh (Terawatts/hora) por ano o que equivale ao consumo anual de 3% de toda a eletricidade utilizada na cidade de Copenhague. Este parque eólico está ilustrado na Figura 35.

Figura 35: Parque eólico de Middelgrunden, Dinamarca



Fonte: <<http://photos.com.br/a-terra-vista-do-ceu-2/yann-arthus-bertrand-parque-eolico-offshore-middelgrunden-ao-largo-de-copenhague-dinamarca/>>

4.4 APLICAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

4.4.1 HIDROELETRICIDADE

A aplicação de turbinas hidráulicas ocorre em suma maioria nas hidroelétricas. E quando se fala em hidroeletricidade, logo se associa a matriz energética brasileira, que tem cerca de sessenta por cento desta constituída da hidroeletricidade. Assim, por

possuir uma ampla quantidade dessas instalações, se torna a locação mais fácil para se achar exemplos dessas construções e de suas turbinas.

No caso do Brasil, a hidroelétrica mais conhecida e a maior até o momento é a usina hidroelétrica de Itaipu, ilustrada na Figura 36, uma construção binacional construída e utilizada por dois países, Paraguai e Brasil, montada num trecho do rio Paraná na fronteira onde esses países se encontram. Tendo ao todo um total de vinte unidades de geração, que provém uma capacidade de 14.000 Megawatts. Esta capacidade de geração permite que duas unidades possam estar em manutenção ou revisão, enquanto as demais mantêm a operação. Sendo que o conjunto da unidade geradora é gerador e turbina, e esse possui capacidade de setecentos Megawatts. E desse total de unidades, metade delas tem a frequência da rede brasileira (60 Hertz) e a outra metade tem a frequência da rede paraguaia (50 Hertz). E outro fato a se enumerar e de que todas as turbinas instaladas em Itaipu são turbinas Francis.

Figura 36: Vista da usina hidroelétrica de Itaipu.



Fonte: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/01/itaipu-ocupa-primeiro-lugar-em-ranking-de-producao-acumulada-de-energia/25218#.W8TeNmhKjIU>>

Além de Itaipu, para demonstrar a utilização de outro tipo de turbina, basta olhar a usina hidroelétrica de Henry Borden, ilustrado na Figura 37, com locação em Cubatão no sopé da Serra do Mar. Esta usina é constituída por duas usinas que apresentam quedas elevadas de setecentos e vinte metros de altura, chamadas de subterrânea e

externa. Tendo um total de quatorze grupos de geradores, sendo todos esses com acionamento por turbinas Pelton, provendo um total de 889 Megawatts.

A usina externa como a mais antiga, tendo em sua composição uma casa de máquinas convencional e externamente oito condutos forçados. Assim tem-se oito unidades geradoras, como descrito anteriormente, tendo seu funcionamento provido pela ação de turbinas Pelton, com capacidade de 469 Megawatts. Sendo duas turbinas acionando cada gerador, acionadas por águas conduzidas.

A usina subterrânea com um total de seis unidades geradoras, instalada no interior rochoso da Serra do Mar, numa caverna com dimensões, com altura de trinta e nove metros, vinte e um metros de largura e de cento e vinte metros de comprimento, e tendo uma capacidade de 420 Megawatts. E cada gerador tem funcionamento provido por turbinas Pelton que operam por jatos de água.

Figura 37: Usina Hidroelétrica de Henry Boeden



Fonte: <<https://umbrasileirosemfronteiras.blogspot.com/2012/11/usina-henry-borden-usina-hidreletrica.html>>

5 Conclusões

Tendo em vista os objetivos, podemos constatar que não se encontra numa situação favorável a aplicação de turbinas a gás e a vapor, já que grande parte da sua utilização destas, se dá em centrais termoelétricas, porém a aplicação das mesmas em centrais de ciclo combinado, para reaproveitamento dos gases e utilização dos ciclos brayton e rankine permitem essa possibilidade de usufruir dessas turbinas. No entanto caso seja somente uma turbina, deve-se considerar as desvantagens. As turbinas a gás tem sua operação em temperaturas elevadas, baixo rendimento e se forem comparadas como motores de pistão, são caras. E as turbinas a vapor tem contra sua aplicação, o fato de necessitarem de um sistema de engrenagens para baixas rotações e a impossibilidade de serem feitas reversíveis. Sem deixar de acrescentar o impacto que as centrais que operam com esses dois tipos de turbinas causam ao ambiente. No caso das turbinas hidráulicas, como grande parte dos rios ao redor do globo já vem sendo utilizados na geração de energia por meio de usinas hidroelétricas indiferente do tipo de usina, e mesmo sendo cotada como fonte renovável, a estrutura da hidroelétrica gera impactos ambientais, pois a área no entorno da barragem é alagada, causando danos a fauna e flora do local e também dependendo da proximidade com as cidades, causa a realocação de pessoas. E no caso das turbinas eólicas mesmo com entraves na questão dos ventos serem intermitentes, na utilização de grandes áreas para implementação, de vibrações e ruídos, de afetaram aves da região e da poluição visual. Mesmo com todos estes pontos contra, esta tecnologia de geração vem recebendo grande investimento e aumentando a quantidade de turbinas instaladas. Principalmente em países europeus, onde a extensão destes não tem muito mais espaço sobressalente para grandes construções de geração, sendo bastante aplicada as instalações de sistemas offshore. Esses sistemas as turbinas são aplicadas no mar, onde devido aos ventos marítimos e o espaço, possibilitam com um dimensionamento mais amplo.

Contudo as turbinas eólicas se destacam nesse novo cenário de energia no mundo, pois a energia que produzem é considerada renovável e apresenta vantagens não somente ao meio ambiente, bem como para a sociedade em geral, desde as comunidades onde estão serão aplicadas até aos que estão trabalhando e inovando com tecnologias para esta área, e também, ao estado retirando a dependência de fontes poluentes em grande parte da matriz energética. Assim com todos os conceitos abordados e

demonstrados nesse trabalho as turbinas eólicas se sobressaem as demais, sendo então a indicação quase que perfeita para a nova matriz energética.

Referências

Cohen, H. Saravanamutto, H.I.H. Rogers, G.F.C. Gas Turbine Theory. 4^oedition. Long Man Group,1996.

Pinto, Milton de Oliveira. Fundamentos de energia eólica. 1^oedição. LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, 2013.

Hau, Erich. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2^oedition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito). Energia eólica princípios e tecnologias. 2008. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>>. Acesso em: 05/03/2018. Arquivo de Pdf do site baixado.

Andrade, S. Alan. Máquinas Térmicas AT-101-aula 10. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-Aula10.pdf>>. Acessado em: 19/04/2018. Arquivo de PDF baixado.

Prioste, B. Fernando. Geração Termoelétrica a Gás. Material de aula deste professor encontrado portal da UDESC de Joinville. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/prioste/materiais/A17_GEE_Termicas_Gas.pdf>. Acessado em: 19/04/2018.

Júnior, M. C. Luiz. Máquinas Térmicas 2. Compilado em 2002. Panambi. Disponível em: < <https://pt.scribd.com/doc/52931373/TURBINAS-A-GAS>>. Acessado em: 19/04/2018.

Twidwell, John. Eolic Turbines. Texto sobre as turbinas eólicas, com conceitos, vantagens, etc. Disponível em: <<https://www.explainthatstuff.com/windturbines.html>>. Acessado em: 27/09/2018.

Roriz, Luiz. Texto com explicação sobre centrais a vapor, encontrado na web. Disponível em: <http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/prodenerg/centrais_vapor.htm>. Acessado em: 27/09/2018.

Texto sobre turbinas Pelton. Somente o texto encontrado na referência. Disponível em: <<https://faeitch2012.wordpress.com/2012/02/28/turbinas-pelton/>>. Acessado em: 27/09/2018.

Guilherme, Antônio. Turbinas Hidráulicas. Disponível em: <http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/turb_hidro.php>. Acessado em: 03/10/2018.

Site da EMAE (Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A). Usina hidroelétrica de Henry Bolden. Disponível em: <<http://www.emae.com.br/conteudo.asp?id=Usina-Hidroeletrica-Henry-Borden>>. Acessado em: 03/10/2018.

Mechanical Tutorial.com. Site online free Mechanical Engineering Study Site. Steam turbine losses. Disponível em: <<http://www.mechanicaltutorial.com/losses-in-steam-turbine>>. Acessado em: 01/10/2018.

Jacobson, E. H. Jacob. Investigation and Validation of Cooling Loss Model for Axial Gas Turbine. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1130415/FULLTEXT01.pdf>>. PDF baixado.

Franklin. Turbinas a vapor introdução. Unicamp. Disponível em:<http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/turbina_vapor_intro.pdf>. Acessado em: 21/05/2017.

Martins Fontes, P. H. Otavio. Aula nº5: turbinas a vapor. Fundação Técnico Educacional Souza Marques. Disponível em:<<https://eletricistamazinho.files.wordpress.com/2011/08/turbinas-a-vapor.pdf>>. Acessado em: 21/05/2017.

Ferraz, Fábio. Turbina a vapor. Parte de uma monografia, sem especificação exata de dados. Disponível em:< <https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/turbinas-a-vapor.pdf>>. Acessado em: 26/05/2017.

Eduardo. Turbina Hidráulicas capítulo 6. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em:< http://paginapessoal.utfpr.edu.br/eduardomg/maquinas-defluxo/materia/Cap.6_Turbinas.pdf/at_download/file>. Pdf Baixado.

Turbinas Hidráulicas. Unesp. Capítulo 8. Sem autor especificado. Material completo do capítulo. Disponível em:< <http://www.dem.feis.unesp.br/intranet/capitulo8.pdf>>. Acessado em: 25/05/2018.