

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

PEDRO HEITOR MARTINS BELO MARINO

TURBINA A GÁS

RIO DE JANEIRO

2014

PEDRO HEITOR MARTINS BELO MARINO

TURBINA A GÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica/Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador (a): Prof. HermannRegazziGerk

RIO DE JANEIRO

2014

PEDRO HEITOR MARTINS BELO MARINO

TURBINA A GÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica/Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador:

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a deus pela oportunidade de estar preparando um trabalho de conclusão de curso da Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante.

Agradeço a meus pais pelo esforço que fizeram, pois sem eles nada disso seria possível.

Agradeço a Camila, minha fiel e companheira namorada que está comigo em momentos de tristeza e de alegria.

Agradeço também aos meus amigos que por três anos estiveram ao meu lado; e ao meu orientador pelos conhecimentos que me proporcionou durante a confecção deste trabalho.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência, são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”. (Leonardo da Vinci)

RESUMO

Turbinas a gás são máquinas utilizadas para gerar trabalho mecânico a partir da energia térmica proveniente da queima de um combustível. Tais equipamentos são usados em grande escala na geração de eletricidade mundial e o estudo dos mesmos vem ganhando cada vez mais importância para o Brasil, devido a um aumento da demanda pela fonte energética térmica no país. A geração de energia também se faz presente nos navios devido ao fato de tal equipamento atingir altas rotações e gerar mais energia que um motor alternativo. Este trabalho visa apresentar as características dessas máquinas quando utilizadas na aviação, na propulsão naval, na geração de energia elétrica e na cogeração. Os fenômenos que ocorrem durante a partida e o procedimento de partida também estão sendo abordados nesse trabalho. Pode-se concluir que a turbina é uma máquina mais confiável, durável e tecnológica que um motor alternativo.

Palavra-chave: Turbina a gás. Geração de energia. Componentes. Partida

ABSTRACT

Gas turbines are machines used to generate mechanical work from thermal energy from the combustion of a fuel. Such devices are used in large-scale generation of electricity worldwide and the study of them is gaining more importance to Brazil, due to increased demand for thermal energy source in the country. Power generation is also present in the vessels due to the fact that equipment reaches high speeds and generate more power than a reciprocating engine. This paper presents the characteristics of these machines when used in aviation, naval propulsion, the power generation and cogeneration. The phenomena that occur during the start and the starting procedure are also being addressed in this work. It can be concluded that the turbine is a more reliable and durable technology than an alternative machine motor.

Keyword: Gas turbine. Power generation. Components. Startup

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Eolípila de Herão de Alexandria: o posicionamento e a configuração dos escapamentos gera um torque quando a água no interior da esfera oca é aquecida.
- Figura 2 - Máquina a gás de John Barber, publicada em sua patente de 1791.
- Figura 3 - Primeira turbina a gás industrial em operação no mundo: instalada em Neuchatel, na Suíça, era utilizada na geração de energia elétrica.
- Figura 4 - Geração de energia elétrica nos Estados Unidos por fonte (2011).
- Figura 5 - Geração de energia elétrica na China por fonte (2010)
- Figura 6 - Geração de energia elétrica no Brasil por fonte (2011) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2012).
- Figura 7 - Evolução do percentual da capacidade instalada das usinas termelétricas.
- Figura 8 - Ilustração do funcionamento de uma máquina térmica. T_H representa a fonte quente e Q_H o calor recebido desta fonte. Q_C é o calor fornecido a fonte fria, representada por T_C . W é o trabalho executado pela máquina.
- Figura 9 - Esquema de uma turbina a gás em ciclo simples aberto.
- Figura 10: Esquematização do ciclo Brayton. (b): Diagrama temperatura x entropia do ciclo Brayton.
- Figura 11 – Sistema do reverso de uma aeronave.
- Figura 12 - Turbina a gás com eixo duplo e saída separada (GIAMPAOLO, 2006).
- Figura 13-Vista explodida de uma turbina RollsRoyce
- Figura 14 - Ilustração da entrada do compressor com as IGVs. Retirada de (CLEYNEN, 2011).
- Figura 15 – Compressor axial (COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996).
- Figura 16 – Compressor radial (COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996).
- Figura 17 - Câmara de combustão convencional (GIAMPAOLO, 2006).
- Figura 18 - Fluxo desacelerando (a); fluxo acelerando (b) (GIAMPAOLO, 2006).
- Figura 19 – Ilustração de uma turbina a gás. Retirado de (WALLCHAN).

Figura 20 - Uma das telas do SPPA-T3000, da Siemens (SIEMENS).

Figura 21 - Diferença entre fluxo normal na palheta e fluxo com *stall*(NFL, 1998)

Figura 22 - Gráfico qualitativo da linha de *surge*.

Figura 23 - Típico comportamento da velocidade de rotação durante a partida.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada em termelétricas em 2001 e 2011.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 HISTÓRICO	12
2.1 HISTÓRICO DE TURBINAS A VAPOR	13
2.2 HISTÓRICO DE TURBINAS A GÁS	14
2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	17
3 FUNDAMENTOS DE TURBINAS A GÁS	21
3.1 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	22
3.2 LEIS DA TERMODINÂMICA	22
3.2.1 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	22
3.2.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	23
3.3. MÁQUINAS TÉRMICAS	23
3.4. CICLO BRAYTON OU CICLO SIMPLES	24
3.6. TURBINAS A GÁS	26
3.6.1. TURBINA A JATO	26
3.6.2. TURBINA PARA ACIONAMENTO MECÂNICO	27
3.6.3. FUNCIONAMENTO	28
4. APLICAÇÕES	29
4.1. NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (TERMELÉTRICAS)	29
4.1.1.VANTAGENS E DESVANTAGENS	30
4.2. NA PROPULSÃO A JATO	31
4.3. NA PROPULSÃO NAVAL	32
4.4. NA COGERAÇÃO	34
4.4.1. DEFINIÇÃO DE COGERAÇÃO	34
4.5. CICLO DE COGERAÇÃO COM TURBINAS A GÁS	34

4.5.1. ENERGIA NA EXAUSTÃO DAS TURBINAS A GÁS	34
4.5.2. COGERAÇÃO COM TURBINA A GÁS	34
5. COMPONENTES	35
5.1. COMPRESSOR	35
5.2. CÂMARA DE COMBUSTÃO	37
5.3 TURBINA	39
6. PARTIDA	41
6.1. O COMPRESSOR NA PARTIDA	42
6.1.1. FENÔMENOS DE INSTABILIDADE	43
6.2. O PROCEDIMENTO DE PARTIDA	45
7. RENDIMENTO	48
CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	50

1.Introdução

Neste trabalho serão apresentadas as características e definições, dessa máquina fantástica, chamada Turbina a Gás. Esta apresentação irá apresentar, também, as aplicações e os principais componentes desta máquina. Este equipamento foi aprimorado a partir do momento em que as máquinas, ou motores, alternativos não forneciam mais as velocidades e rotações necessárias para determinadas tarefas, como exemplo a geração de energia da ordem de Mega watts.

Essas máquinas também equipam as aeronaves levando-as a velocidades supersônicas, ou seja, acima da velocidade do som. Há também a apresentação das “variações” de tais aplicações, tal como a cogeração, sendo esta uma das formas de se reaproveitar a energia em forma de calor gerada na descarga da Turbina a Gás. A turbina apresenta a vantagem de possuir um ciclo contínuo, diferente dos motores alternativos que só realizam trabalho em um ciclo. Vale ressaltar que esses equipamentos quando empregados em aviação ou em embarcações utilizam combustíveis líquidos, o “gás” será gerado na descarga da combustão o que movimentará as peças rotativas.

2. Histórico

Turbinas são máquinas capazes de converter a energia presente em uma corrente de fluido em trabalho. Suas numerosas utilidades envolvem sempre a transformação deste trabalho em uma forma útil de energia para o homem, como elétrica ou mecânica. As turbinas podem ser classificadas com base em diversos critérios; um deles é quanto ao fluido de trabalho utilizado. Por fluido de trabalho entende-se o fluido que, inserido na turbina, disponibilizará sua energia térmica e cinética à própria turbina, fazendo-a girar suas palhetas concêntricamente conectadas a um eixo. Por turbinas a gás entende-se, portanto, uma turbina cujo fluido de trabalho é um gás. Desde suas origens, as turbinas a gás e as turbinas a vapor têm sido utilizadas em diversos campos essenciais às atividades necessárias ao homem, tais como o transporte aéreo e a geração de energia elétrica. Seu desenvolvimento, assim como toda tecnologia de ponta, está comumente relacionado às questões que envolvem as fronteiras tecnológicas da época e, mais ainda, as suas aplicações estão comumente associadas a modificações brutais e profundas das relações sociais e econômicas vigentes. Certamente, sua importância representa um dos

melhores exemplos de como a engenharia pode revolucionar áreas exógenas à própria engenharia.

2.1. Histórico de turbinas a vapor

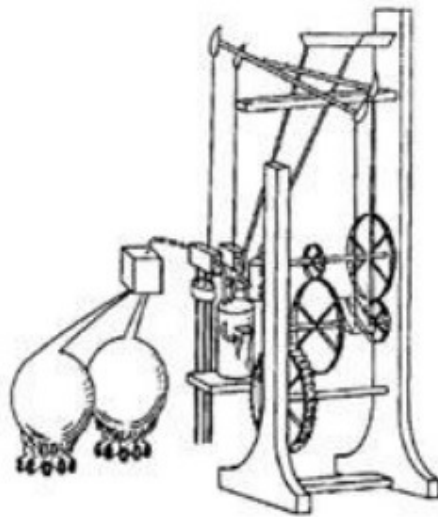
Inicialmente, o fluido utilizado como fluido de trabalho e empregado nas máquinas primitivas restringia-se ao vapor: o aquecimento do líquido (em geral, água) gerava vapor e fazia mover um pistão ligado a um elemento capaz de realizar movimento rotacional. O uso de dispositivos deste tipo no auxílio à execução de tarefas remonta ao século XVIII, quando a Revolução Industrial inglesa deu forma às máquinas que aumentariam a produtividade do trabalho até então totalmente manual. O inventor e engenheiro mecânico escocês James Watt (1736-1819) aperfeiçoou os trabalhos já existentes – notadamente, os do inventor inglês Thomas Newcomen (1663-1729) – e popularizou o mecanismo. Mais tarde, no século XIX, as máquinas a vapor seriam as catalisadoras da industrialização europeia: antes apenas ferramentas de produção, elas se tornaram ferramentas também de transporte. A inovação do transporte sobre trilhos com a utilização de locomotivas a vapor foi fundamental na dinamização do cenário capitalista europeu, encurtando distâncias entre os grandes centros e entre as matérias primas e o mercado consumidor. Às máquinas a vapor deve-se a criação de toda a malha ferroviária europeia do século XIX, evidenciando que os impactos de seu desenvolvimento técnico transcendem os próprios domínios da engenharia e tornam-se também, com alta relevância, políticos, econômicos e sociais. Esses não são, no entanto, os primeiros registros de máquinas a vapor. O conceito de transformar a energia térmica em movimento rotacional é muito mais antigo: Herão de Alexandria (10 DC – 70 DC) inventou um artefato capaz de girar com vapor d'água, chamado de Eolípila, que pode ser visto na Figura 1. O mecanismo baseava-se em uma esfera oca, com dois escapamentos curvos diametralmente opostos, ligada através de tubos a um recipiente com água. Quando submetida a aquecimento, a água no interior do recipiente transformava-se em vapor, que, ao se encaminhar para a esfera através dos tubos, escapava e gerava um torque que a fazia girar.



As turbinas a vapor modernas, evidentemente, em muito se distanciam destes modelos rudimentares. A história aponta o também inglês Sir Charles Parsons (1854-1931), em 1884, por ter criado o primeiro modelo moderno de turbina a vapor, muito depois, portanto, do advento da Revolução Industrial. Esse modelo teve seus direitos de produção adquiridos por George Westinghouse (1846-1914) e resultou na primeira turbina a vapor comercial, com 400 kW de potência (LORA e NASCIMENTO, 2004). O desenvolvimento de turbinas, em seguida, acentuou-se de forma destacada no século XX, ancorado por utilidades bélicas, industriais e de geração de eletricidade. Boa parte do grande desenvolvimento técnico observado em diversos campos da nossa sociedade no século passado deveu-se à utilização e ao aprimoramento das turbinas.

2.2. Histórico de turbinas a gás

A ideia de utilizar o ar como fluido de trabalho, comprimindo-o e aquecendo-o para transformar sua energia em trabalho, foi publicada pelo inventor inglês John Barber (1734-1801) em uma patente datada de 1791. Uma ilustração de sua máquina segue na Figura 2. Em sua invenção, Barber separou o ar e o combustível em dois compartimentos diferentes para em seguida comprimi-los e encaminhá-los a uma câmara de combustão, onde o processo de queima gerava gases que eram expelidos em um mecanismo rotacional. A inexistência de materiais adequados associada às dificuldades técnicas referentes principalmente à compressão incubou a ideia de Barber por mais de um século.



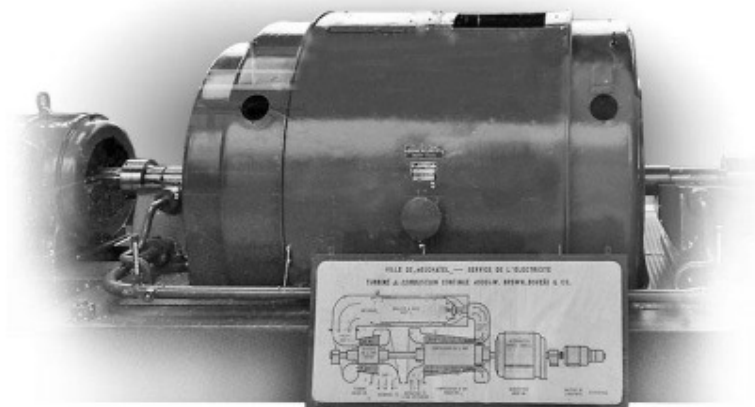
A possibilidade de se usar o ar atmosférico em vez de água – criando equipamentos menores, mais leves e de maior usabilidade – motivou o desenvolvimento do conceito e Barber. No início do século XX, alguns estudiosos já previam a iminência das turbinas a gás.

Em 1917, o Capitão Henry RiallSankey (1853-1926), engenheiro irlandês e capitão do Exército Britânico, declarou em uma aula lecionada no Instituto de Engenheiros Mecânicos (Institution of Mechanical Engineers, em inglês) que “(...)as turbinas a vapor serão utilizadas nas grandes instalações industriais ... até que surja uma turbina a gás satisfatória” (HUNT, 2011).

Foi muito depois de Barber, de fato, que os primeiros avanços concretos se deram. Entre o final do século XVIII e início do século XIX, algumas tentativas foram realizadas, mas sem sucesso. Em 1903, o norueguês AegidiusElling (1861-1941) construiu a primeira turbina a gás operacional, capaz de produzir mais energia do que consumia, com aproximadamente 11 cavalos de potência (GOSWAMI e KREITH, 2005). O feito, contudo, não conseguiu atrair grande atenção à sua época por suas limitações e por não apresentar grande viabilidade. No mesmo ano, Rene Armengaud e Charles Lemale trabalharam em conjunto na França com o objetivo de construir também uma turbina a gás. O trabalho, que ficou bastante conhecido, teve o mérito de utilizar um sistema de resfriamento à base de água eficiente para a época. Um projeto mais bem

sucedido foi executado em 1905 pela Brown Boveri (atual ABB – ASEA Brown Boveri). A empresa instalou a primeira turbina a gás industrial, que fornecia 4.400 kW de gás aquecido e pressurizado e 900kW de energia elétrica (GIAMPAOLO, 2006). Foi o projeto do engenheiro mecânico alemão Hans Holzwarth (1877-1953), no entanto, que ganhou o maior destaque na época ao introduzir o conceito de queima a volume constante, enquanto que os projetos anteriores utilizavam queimadores de pressão constante. Holzwarth supervisionou diversos projetos até 1933, quando a Brown Boveri instalou em Hamborn, na Alemanha, a primeira turbina comercial proveniente de suas ideias, com 5MW de potência (MCNEIL, 1990).

O desenvolvimento permaneceu lento na primeira metade do século XX. Foi somente em 1939 que a Brown Boveri construiu e instalou, na cidade de Neuchatel, na Suíça, a primeira turbina a gás dedicada à geração de energia elétrica, com 4MW de potência, apresentada na Figura 3 (GIAMPAOLO, 2006). Desativada apenas em 2002, tendo operado, portanto, por 63 anos, a turbina encontra-se hoje em poder da Alstom, em uma casa de exposições em Birr, na Suíça (ASME).



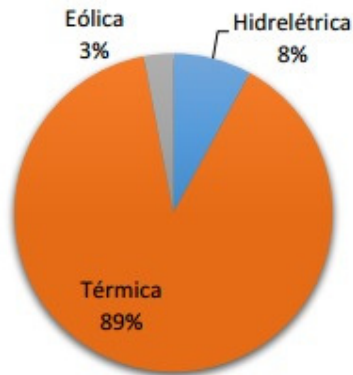
Neste mesmo ano, no entanto, foi deflagrada a Segunda Guerra Mundial (1939-1945). A despeito das intenções bélicas e motivações de caráter desprezível, todas as grandes potências envolvidas viabilizaram uma soma inigualável de recursos financeiros e humanos à disposição do avanço científico e tecnológico, em especial para comunicações, materiais e transporte. Neste cenário, emergiu Sir Frank Whittle (1907-1996), piloto e engenheiro aeronáutico inglês, e Dr. Hans vonOhein (1911-1998),

engenheiro alemão. Ambos são creditados pelo desenvolvimento das primeiras turbinas aeronáuticas da história, em trabalhos independentes e praticamente concomitantes (THE DRAPER PRIZE). Ohein finalizou seus trabalhos antes de Whittle, em 1937, e o primeiro jato operacional impulsionado por turbinas a gás foi desenvolvido em solo alemão: em 1939, nascia o Heinkel He 178. Neste mesmo ano, Whittle finalizou seus trabalhos com sua turbina a gás aeronáutica e em 1941 voava sobre solos ingleses o Gloster Meteor.

O pioneirismo das obras de Ohein e Whittle, assim como o posterior aperfeiçoamento da aviação militar e comercial, fez nascer e crescer um campo próspero para o progresso das turbinas a gás. Até hoje, boa parte das turbinas industriais são derivadas de modelos criados para a aviação. A segunda metade do século XX também reservou grandes inovações no campo da engenharia de materiais, técnicas de resfriamento e aerodinâmica, fundamentais para o seu desenvolvimento. Entre os fabricantes atuais de turbinas a gás destacam-se GE, Siemens, Hitachi, Ansaldo Energia, Alstom e Rolls-Royce.

2.3. Geração de energia elétrica

A geração de energia elétrica é notadamente um dos campos de maior aplicação das turbinas a gás. As usinas termelétricas são largamente utilizadas e, mais do que isso, geram a maior parte de toda a energia consumida pela população mundial. O balanço energético europeu (2009), responsável pelas estatísticas dos 27 países da União Europeia, apresenta dados conclusivos: 84% de toda a energia elétrica produzida na região provêm de fontes térmicas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY)¹. Nos Estados Unidos (2011), 89% de toda a energia elétrica produzida pelo país foi gerada em usinas térmicas – seja nuclear, a carvão, gás natural, biomassa ou petróleo e derivados² (U.S ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA), 2012). A Figura 4 mostra a participação das fontes de energia no cenário energético americano.

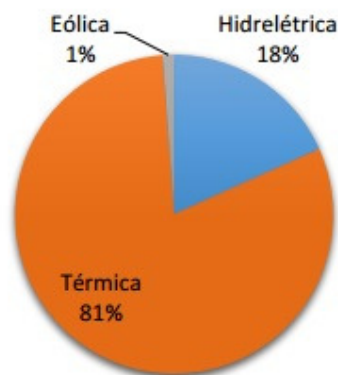


A China também é altamente dependente de usinas térmicas. Mesmo após movimentos do governo chinês de investir na diversificação de sua matriz energética

¹Carvão e turfa (26,47%), óleo (2,98%), gás (22,61%), biocombustíveis (2,85%), lixo (1%), nuclear (27,85%), geotérmica (0,17%), solar (0,43%) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY)

²Carvão (42%), gás natural (25%), nuclear (19%), petróleo (0,47%), outros gases (0,27%), biomassa (1,38%), geotérmica (0,41%), solar (<0,1%).

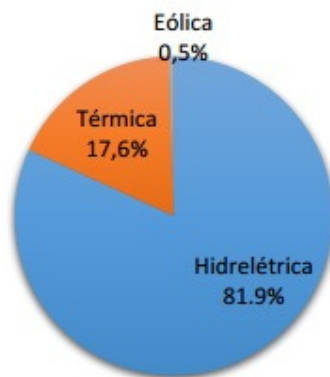
(culminando na usina hidrelétrica de Três Gargantas, a maior do mundo com 22,5 GW de capacidade instalada), 81% de toda a energia produzida na China em 2010 proveio de térmicas³ (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011). A Figura 5 mostra a participação das fontes energéticas no cenário chinês.



O cenário brasileiro é notoriamente diferente. A matriz energética nacional possui como base fontes de energia renováveis, com grande destaque para a geração hidrelétrica. O

Brasil possui 12% da água doce do mundo, em superfície e em boas condições de Exploração, apresentando um potencial hidrelétrico estimado em 260GW (PORTAL BRASIL). Sob esse cenário, é natural esperar que a hidroeletricidade desempenhe um importante papel na matriz energética. O Balanço Energético Nacional (2012) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2012) referente ao ano de 2011 mostra que 81,9% de toda a energia elétrica gerada no país proveio de fontes hidrelétricas, enquanto que as térmicas foram responsáveis por 17,6%. A Figura 6 mostra a participação das fontes na produção de eletricidade em 2011.

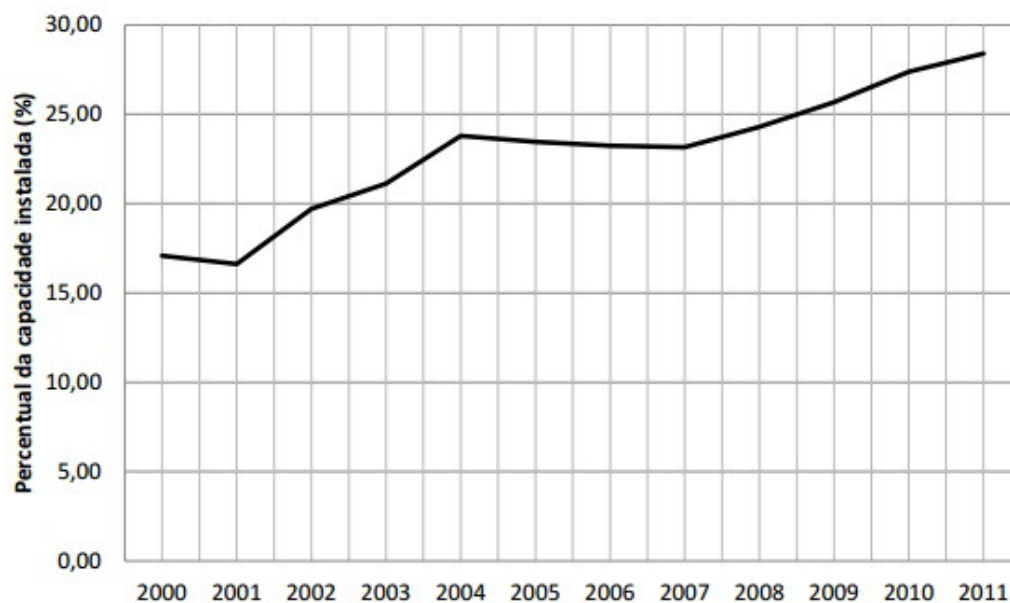
³Térmicas convencionais (78,45%), nuclear (1,79%), biomassa (0,29%) (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011).



As usinas termelétricas brasileiras, além disso, atuam em caráter de suporte: com exceção das usinas nucleares, elas são acionadas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) somente em caso de necessidade, ou seja, em casos de a energia proveniente das hidrelétricas mostrar-se insuficiente ou em outros casos em que o ONS julgar relevante o seu acionamento. Desse modo, elas constituem essencialmente uma reserva do sistema. No entanto, é justamente aí que reside sua importância para o país: elas representam a maior barreira contra um racionamento de energia elétrica, como o ocorrido em 2001. Não à toa, a potência instalada em termelétricas quase triplicou entre 2001 e 2011 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2012), conforme mostrado na Tabela 1.

2001	2011
12.447MW	33.250MW

A capacidade instalada de termelétricas sobre a capacidade total do sistema também apresentou grande avanço no período, como é mostrado na Figura 7. Em 2001, as termelétricas representavam 16,62% de toda a potência instalada do sistema (incluindo a fonte nuclear), enquanto que em 2011 este índice saltou para 28,39%, evidenciando um aumento real e significativo da sua participação na matriz energética brasileira EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2012).



O ano de 2012 evidenciou a importância das usinas termelétricas. Com a escassez de chuvas, os reservatórios apresentaram grande queda no volume de água armazenada, o que gerou a necessidade de acionamento das térmicas. No entanto, os primeiros meses do ano são os meses mais úmidos e é de se esperar que os reservatórios se encham, o que não tem acontecido. O nível de armazenamento dos reservatórios hidrelétricos do subsistema Sudeste/Centro-Oeste fechou o mês de fevereiro em 45,48% (ONS, 2013), enquanto no mesmo período de 2011 encontrava-se com 80,13% (ONS, 2013). É presumível, portanto, que as termelétricas ainda sejam mantidas acionadas ao longo de 2013.

Os investimentos também não cessaram: desde 2005, de toda a energia elétrica negociada nos leilões de energia nova, 42,9% representam fontes térmicas, quase se equiparando ao percentual de hidrelétricas: 46,58% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013). O percentual de térmicas tende a aumentar na medida em que ficam mais restritivos os licenciamentos ambientais de hidrelétricas. Os leilões de energia nova mais recentes, realizados em 2011 e 2012, apontam para maior utilização de térmicas à biomassa e a gás natural, principalmente.

Todo esse cenário gera e renova demandas de estudo pela geração termelétrica e, conseqüentemente, por suas áreas associadas. O estudo de turbinas a gás insere-se naturalmente neste escopo, representando uma base fundamental na área. O controle de turbinas a gás industriais em regime permanente é bem conhecido e difundido na literatura, embora faltem informações mais profundas e estratégias mais eficientes sejam estudadas. Um gargalo, no entanto, é representado pela partida do sistema. Em usinas termelétricas, este é o momento mais problemático e delicado da operação, e envolve questões de segurança dos equipamentos da planta em geral, em especial das turbinas.

3. Fundamentos de turbinas a gás

Uma usina termelétrica é uma central industrial capaz de gerar energia elétrica a partir do calor, fornecido geralmente na queima de biomassa, gás natural, óleo diesel, óleo combustível, carvão natural ou então na fissão do Urânio em reatores nucleares. As turbinas são os equipamentos utilizados para transformar esse calor em energia mecânica, que posteriormente é transformada em energia elétrica por um gerador acoplado ao eixo da turbina. Para entender plenamente o funcionamento de uma turbina a gás dentro de uma central termelétrica, é necessário analisar previamente os princípios da Termodinâmica envolvida, priorizando os ciclos termodinâmicos aos quais as turbinas estão submetidas.

3.1. Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas são as variáveis do escopo da Termodinâmica que definem o estado de um sistema em um determinado momento de análise. Estas propriedades são chamadas de extensivas quando associadas à massa do sistema, como volume, energia, entropia, ou intensivas quando não associadas, como temperatura e

pressão. As propriedades de um sistema podem sofrer mudanças ao longo do tempo. Quando isso ocorre, há uma mudança de estado. Quando os estados termodinâmicos se sucedem de modo que o sistema retorna ao seu estado inicial, diz-se que foi percorrido um ciclo termodinâmico.

3.2. Leis da Termodinâmica

3.2.1. Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica trata da conservação de energia. Simplificadamente, em um sistema fechado, a variação da energia interna é igual às trocas de energia realizadas com o meio externo através de trabalho e transferência de calor, como se pode ver na Equação (1).

$$\Delta u = Q - W \quad (1)$$

A energia interna U do sistema, assim como a energia potencial e energia cinética, é uma propriedade extensiva e compreende todas as formas de energia relacionadas com o sistema (MORAN, 1999).

Trabalho e transferência de calor são as duas maneiras existentes para um sistema fechado interagir com o exterior.

Na Termodinâmica, um sistema realiza trabalho se o único efeito ao meio externo resultante de sua interação puder ser o levantamento de um peso (VAN WYLEN e SONNTAG, 1986). Não é necessário haver de fato um levantamento de peso para constituir trabalho, é apenas necessário haver a possibilidade de este ser o único efeito da interação. A definição é análoga à da mecânica, mas é levada às vistas da Termodinâmica ao englobar os conceitos de sistema, propriedades e processos. Deve-se notar também que o trabalho é positivo se realizado pelo sistema e negativo se realizado sobre o sistema.

Calor é um fluxo de energia proveniente de um sistema em uma dada temperatura para outro sistema em uma temperatura inferior (VAN WYLEN e SONNTAG, 1986), ocorrido exclusivamente pela diferença de temperatura entre os dois sistemas. É incorreto atribuir, portanto, calor a um corpo; o calor é um fenômeno transitório, assim como o trabalho: o que pode ser percebido é o seu fluxo entre dois sistemas.

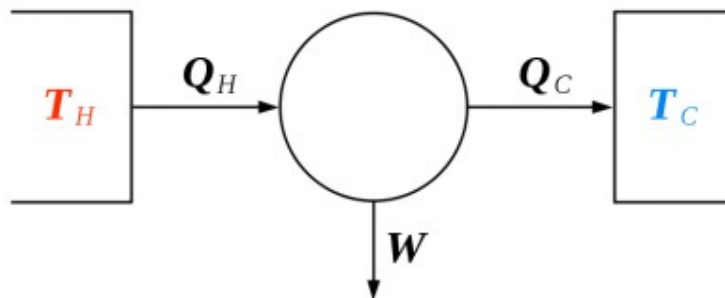
3.2.2. Segunda Lei da Termodinâmica

A Segunda Lei da Termodinâmica é baseada nos conceitos de entropia e energia. A entropia pode ser definida como uma grandeza para medir o grau de irreversibilidade de um sistema. O princípio da entropia diz que "se um processo irreversível ocorre em um sistema fechado, a entropia desse sistema sempre aumenta; ela nunca decresce" (RESNICK, HALLIDAY e KRANE, 2007).

Já a energia total de um sistema fechado sempre permanecerá igual independente do processo que tenha ocorrido. Como exemplo de processo reversível pode-se imaginar um pedaço de metal sobre uma chapa aquecida a uma temperatura T . Elevando-se a temperatura da chapa de um pequeno valor, uma pequena quantidade proporcional de calor será transferida para o pedaço de metal. Ao reduzir a temperatura da chapa novamente para T , a mesma quantidade de calor anterior que foi para o pedaço de metal retornará para a chapa. Para exemplificar um processo irreversível, pode-se imaginar dois blocos metálicos em contato, onde um está mais quente que o outro. Após certo tempo, parte do calor terá saído do bloco mais quente para o mais frio, igualando a temperatura de ambos.

3.3. Máquinas térmicas

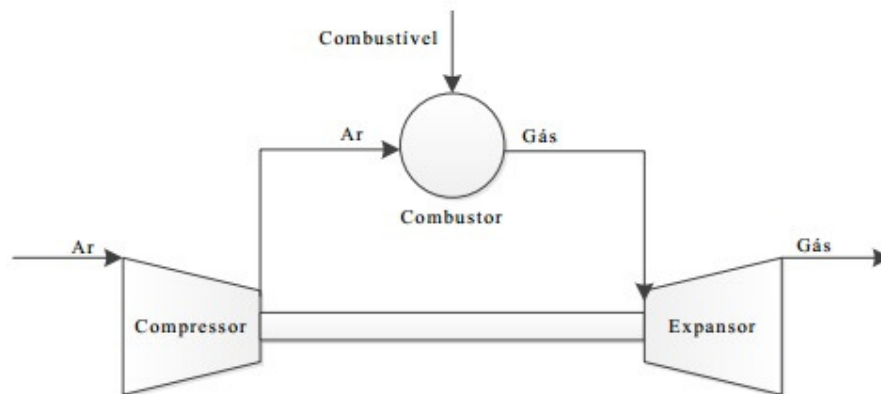
Máquinas térmicas são dispositivos capazes de transformar energia térmica em trabalho através da transferência de calor de um corpo quente para um corpo frio operando em um ciclo termodinâmico (VAN WYLEN e SONNTAG, 1986). Uma ilustração do processo encontra-se na Figura 8.

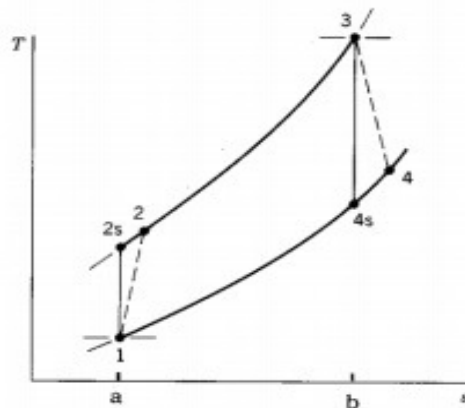
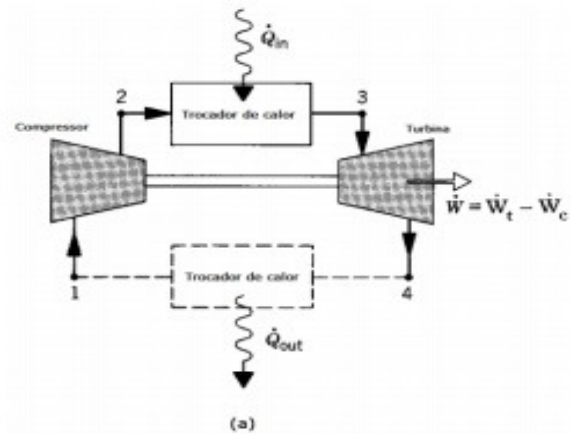


Uma máquina térmica deve necessariamente ser caracterizada por operar em um ciclo. Será feita, portanto, uma breve introdução dos principais ciclos termodinâmicos existentes em usinas termelétricas.

3.4. Ciclo BRAYTON ou ciclo simples

O ciclo Brayton é o ciclo ideal que define o funcionamento de turbinas a gás, esquematizado na Figura 9. Este ciclo consiste de quatro transformações reversíveis em série, sendo duas adiabáticas e duas a pressão constante de modo alternado. Uma das características que diferenciam este dos ciclos dos motores alternativos, é a continuidade das etapas de compressão, combustão, expansão e descarga, o que se mostra diferente nos motores alternativos, o qual possui um tempo para cada etapa. Na Figura 9, o ar de entrada no compressor sofre uma compressão reversível e adiabática, sendo, portanto, chamada de isentrópica. Esta etapa é representada pelo segmento 1-2s na Figura 10(b). Em seguida, o ar sofre um aquecimento no combustor, a pressão constante, no segmento 2s-3. Em seguida o ar é comprimido, em um processo também isentrópico, em 3-4s. Por fim, o ar é resfriado em 4s-1, a pressão constante.





O ciclo Brayton ideal deve respeitar a sequência 1-2s-3-4s-1 como mostra a Figura 10(b), mas o que ocorre na realidade é a sequência 1-2-3-4-1 devido ao fato de tanto o compressor como a turbina não serem ideais e, dessa forma, tanto a compressão e a expansão não são processos totalmente reversíveis devidos a alguns fatores, como, por exemplo, o atrito entre o fluido de trabalho e as palhetas. A área dentro da sequência 1-2s-3-4s-1 representa a quantidade de calor adicionada por unidade de massa, que, em um ciclo, é igual ao trabalho realizado.

Nas plantas com turbinas a gás operando em ciclo aberto, a transformação do ponto 4/4s para o ponto 1 na sequência da Figura 10(a), representado por uma linha tracejada, na verdade ilustra a saída dos gases de combustão da turbina a gás para o ar atmosférico. Não há um componente físico presente no sistema para realizar essa troca de calor.

Uma turbina a gás operando em ciclo Brayton possui eficiência em torno de 40% (LORA e NASCIMENTO, 2004).

3.6. Turbinas a gás

Por turbinas a gás entende-se uma máquina térmica operando em ciclo Brayton, composta por compressor, combustor e turbina (ou expensor), conforme a Figura 10. A quantidade de compressores, expansores e a configuração do eixo podem variar. As turbinas a gás são amplamente utilizadas com as mais diversas finalidades em todo o mundo, desde simples acionamentos mecânicos até poderosos túneis de vento ou impulsão de aviões e navios. Dependendo da sua aplicação, a turbina será considerada uma turbina a jato ou uma turbina para acionamento mecânico.

3.6.1. Turbina a jato

Essa categoria compreende as turbinas usadas em aplicações aéreas e se divide em três subcategorias, dependendo da forma de como o gás aquecido é expandido em seu interior:

.Turbojato: quando o gás se expande através de um único bocal para gerar impulso.

.Turbofan: quando parte do gás se expande através de um bocal para gerar impulso e outra parte se expande na turbina para girar suas palhetas. Esse tipo é utilizado na aviação comercial e um fato curioso sobre esse equipamento seria o sistema de frenagem da aeronave, ou o reverso da turbina, que é constituído de duas “palhetas” móveis que quando acionadas redirecionam o fluxo para frente, gerando assim um impulso contrário ao movimento da aeronave. A figura 11 ilustra o momento de acionamento de sistema de reverso.



.Turbohélice: quando todo o gás se expande na turbina que aciona o compressor e nenhum impulso é gerado ao sair pelo bocal.

A última subcategoria se assemelha muito com as turbinas de uso industrial, algo que não é estranho, pois muitas vezes a estrutura básica da turbina a gás é a mesma para as aplicações na aviação e na indústria. Com o tempo conseguiu-se adaptar as turbinas de uso aéreo para aplicações terrestres, inclusive em carros de corrida (GIAMPAOLO, 2006), e ficaram conhecidas como turbinas aeroderivativas.

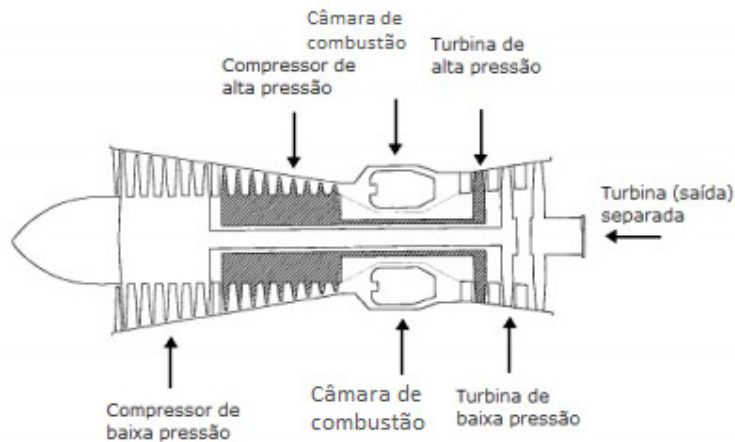
3.6.2. Turbina para acionamento mecânico

As turbinas que fazem parte desta categoria são as grandes turbinas industriais (também conhecidas como heavy duty) e as turbinas aeroderivativas. Existem três configurações diferentes para as turbinas de acionamento mecânico:

. Eixo único integral: nessa configuração o eixo de saída, que será utilizado para acionar outro equipamento, é uma continuação do eixo principal da turbina a gás, que conecta o compressor à turbina.

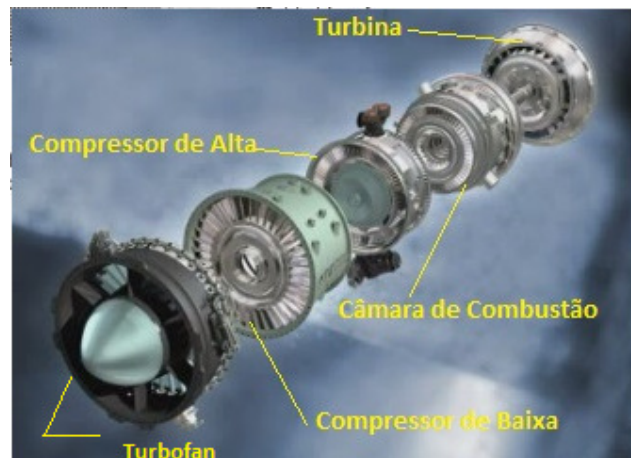
. Eixo único com saída separada: o eixo de saída não fica conectado fisicamente ao eixo principal. Diz-se, então, que os eixos ficam acoplados aerodinamicamente uma vez que se pode controlar a velocidade de rotação do eixo de saída através da rotação do eixo principal. Tal configuração permite que a turbina opere na mesma rotação do equipamento acionado ou até mesmo em frequências maiores que a da rede elétrica em que a turbina a gás está conectada. Além disso, para velocidades de turbina diferentes da velocidade do eixo, elimina-se a necessidade de uma caixa de redução, que pode acarretar perdas de potência de até 4% (GIAMPAOLO, 2006).

. Múltiplos eixos com saída separada: similar à turbina a gás de eixo único com a saída separada, mas como o próprio nome sugere, ela possui dois ou três eixos concêntricos, formando mais de um estágio de compressão e expansão. A Figura 12 ilustra um exemplo de uma turbina a gás com dois eixos, ou seja, há dois compressores e duas turbinas, formando um estágio de baixa pressão e outro de alta pressão. Quando há três eixos existe um estágio de pressão intermediária.



3.6.3. Funcionamento

Com a máquina em funcionamento, o ar é aspirado pelo compressor, comprimido, e forçado, através da câmara de combustão segundo Figura 13. A energia gerada na expansão que se segue à queima do gás aciona a turbina, cujo eixo estão acoplados a carga e o compressor.



4. Aplicações

4.1. Na Produção de Energia Elétrica (Termelétricas)

A turbina a gás é uma forma de motor térmico que produz trabalho a partir de um fluxo contínuo de gases quentes provenientes da queima contínua de um combustível.

A utilização deste tipo de equipamento tem vindo a aumentar devido à variedade de combustíveis que pode queimar e da facilidade com que se pode trocar um combustível para outro sem interrupção de serviço.

São normalmente utilizadas em sistemas de média e de grandes dimensões, para potências desde os 40KW até aos 250 MW. Quando utilizadas em unidades estacionárias, as turbinas obrigatoriamente devem ser colocadas no interior de uma caixa para servir de isolamento acústico.

Por se tratar de unidade estacionária, o fluxo de ar pode ser admitido ou expulso transversalmente ao eixo da turbina.

A turbina a gás, como já foi dito muitas vezes ao longo do trabalho, é um conjunto composto por:

- 1) Admissão de ar;
- 2) Compressão de ar;
- 3) Câmaras de combustão;
- 4) Turbinas e;
- 5) Sistemas de exaustão

Quando o compressor é acionado, seja pelo motor de partida ou durante a operação da máquina pela turbina, ele aspira o ar atmosférico, comprimindo-o e direcionando-o para a câmara de combustão onde o combustível misturado com uma parte do ar proveniente do compressor é queimado, resultando; num fluxo contínuo de ar.

Esse fluxo contínuo de gás de combustão é expandido na turbina de expansão, que extrai do mesmo a energia que permite acionar tanto o compressor da turbina a gás como o equipamento a este acoplado (gerador) produzindo assim energia elétrica.

O excesso de ar (que não foi misturado com o combustível) é utilizado no arrefecimento dos componentes das áreas quentes da turbina a gás (como o rotor) e posteriormente este fluxo é misturado aos gases de combustão provenientes da turbina e a seguir são dirigidos para o sistema de exaustão.

4.1.1. Vantagens e Desvantagens

As principais características que representam vantagens são:

- Fácil manutenção implicando menores tempos de paragem;
- Arranque relativamente rápido;
- Grande viabilidade e baixa poluição ambiental;
- Unidades compactas e de pequeno peso;
- Não necessita de vigilância constante e;
- Disponibiliza energia térmica a temperaturas elevadas (500°C - 600°C).

As turbinas a gás equivalem a geralmente 1/4 em peso e 1/7 em volume quando comparados com os motores alternativos.

Como desvantagens têm-se:

- Utilização menos atrativa em processos com poucas necessidades térmicas e;
- Tempo de vida útil relativamente curto.

4.2. Na Propulsão a Jato

O motor a jato foi inventado em 1937 por Frank Whittle, piloto de testes da Força Aérea Real. Este avanço revolucionário significou que o céu já não era o limite.

E óbvio que se a Força Aérea Real não tivesse se metido, as coisas não teriam mudado. No começo, rejeitaram a idéia de Whittle quando ele a apresentou pela primeira vez na década de 20.

O protótipo de Whittle podia propulsar 1.240 libras, uma fração da potência do jato moderno. Mesmo assim, a invenção marcou uma dramática diferença nos motores de combustão interna que impulsionavam os aviões mais rápidos da era.

O que os fazem diferentes então?

- . Os motores dos jatos com turbinas de gás queimam o combustível pressurizado, causando a expansão do ar e fazendo girar a turbina - o que cria a propulsão em adição com a pós queima na saída do bocal.
- . Os motores de combustão interna são muito semelhantes, exceto que o combustível pressurizado é queimado em pequenas explosões controladas dentro do motor.

A grande diferença entre os dois é a razão potência-peso. Os motores de reação proporcionam uma potência incrível comparada com o peso do aparelho.

Essencialmente, comparar o motor de um jato com o motor de um avião de hélice é como comparar um macaco com um bebê engatinhando.

4.3. Na Propulsão Naval

O nome mais adequado para esse tipo de propulsor é "motor de combustão interna". Porém, os norte-americanos popularizaram o termo "turbina a gás" (*gas turbine*). A propulsão através da turbina a gás nada mais é que a adoção de um motor a jato acoplado num eixo naval, girando um hélice. Os britânicos começaram a trabalhar em turbinas a gás na segunda metade da década de 1940 e lançaram a primeira embarcação do mundo movida por essa nova propulsão em 1953, o HMS *Grey Goose*.

Na década seguinte já se projetavam navios de grande porte exclusivamente movidos por turbina a gás.

Com algumas exceções, quase todas as turbinas a gás utilizadas em navios são "marinizadas" a partir de motores aeronáuticos (aeroderivadas). Porém, para atender

requisitos específicos, algumas alterações são efetuadas. Uma delas é a mudança da câmara de combustão. Por utilizar óleo diesel ao invés de querosene de aviação as câmaras de combustão das turbinas navais apresentam um projeto diferenciado. Em outros casos o material das palhetas do compressor é diferente (feitas de aço nos motores navais e de alumínio nos aviões) e a introdução de um compressor de baixa pressão é necessária.

A utilização de turbinas a gás também implica numa outra mudança. Como elas não podem ser revertidas, os navios equipados somente com esse tipo de propulsão devem possuir câmbio de reversão ou hélice de passo variável (um pouco menos eficiente que os hélices de passo fixo).

Dentre as características principais de desempenho desse tipo de propulsão destacam-se a boa relação peso/potência. Por essa razão, as turbinas a gás atendem tanto a embarcações pequenas como *hovercrafts* e aerobarcos (relação de 100HP por tonelada), escoltas (relação entre 10 e 15 HP por tonelada) e até navios-aeródromos (relação de 5 HP por tonelada). A grande aceleração inicial (uma Kortenaer acelera de 0 a 30 nós em cerca de 75 segundos) também é um atrativo para esse tipo de propulsão, pois com a turbina a vapor era necessário esperar que a pressão das caldeiras atingisse um nível mínimo desejado. Porém, este ótimo desempenho tem um custo. O consumo específico de combustível é relativamente alto. Por este motivo algumas marinhas decidiram adotar turbinas a gás somente para velocidades altas (acima de 18 nós), utilizando um outro tipo de propulsor (p. e. motores diesel) para velocidades baixas.

A introdução das turbinas a gás permitiu uma redução do espaço ocupado quando comparadas com as instalações das casas de máquinas das turbinas a vapor e suas caldeiras. Houve também uma economia em peso. De certa forma, isto trouxe problemas para os projetistas navais da época em que foram introduzidas, pois as pesadas instalações antigas garantiam o equilíbrio dos navios, principalmente quando as grandes antenas de radar traziam peso cada vez maior para as partes mais altas.

Existem dois grupos de turbinas a gás amplamente utilizados no Ocidente. São as britânicas Olympus/Tyne e a norte-americana LM-2500. A Olympus TM-3B é derivada do motor Olympus 593 que equipava o jato anglo-francês Concorde e a Tyne deriva do motor aeronáutico RB.109, utilizado no turbohélice C-160 Transall e algumas

versões do Alenia C-27 (G222) Spartan. Ambas foram adotadas inicialmente na *Royal Navy* no final dos anos sessenta para equipar o projeto no NAe classe Invincible e as escoltas Tipo 21, Tipo 22, Tipo 42. A LM-5200 foi desenvolvida pela General Electric a partir do motor aeronáutico CF6/TF39. A versão civil CF6 equipa diversos aviões comerciais como DC-10, B-747 e B-767. Sua correspondente militar, a TF39, é usada pelo transporte C-5 Galaxy. No meio naval, a LM-5200 é empregada em um grande número de escoltas da *US Navy* tais como as classes O. H. Perry, Spruance, Arleigh Burke e Ticonderoga. Também é largamente utilizada no exterior, fornecendo propulsão para as classes Bremen, Brandenburg (Alemanha), Artigliere (Itália), Álvaro de Bázan (Espanha) e outras. As turbinas LM-2500 possuem um consumo específico de combustível cerca de 10% melhor que as Olympus.

No Brasil, a MB passou a contar com navios movidos por turbinas a gás a partir da década de 1970, quando começaram a chegar as fragatas classe Niterói. Até então, todas as demais escoltas eram movidas por turbinas a vapor ou motores diesel. Hoje, a turbina a gás equipa quase todas as escoltas da Marinha, com exceção do contratorpedeiro Pará. Além das Niterói (que possuem duas turbinas Olympus para altas velocidades), a MB possui a classe Inhaúma, equipada com uma única turbina LM-5200 por corveta e as Tipo 22, com um par de Olympus e outro de Tyne.

4.4. Na Cogeração

4.4.1. Definição de Cogeração

A cogeração é definida como o processo de transformação de energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil.

As formas de energia útil mais frequentes são a energia mecânica e a térmica. A energia mecânica pode ser utilizada diretamente no acionamento de equipamentos ou para geração de energia elétrica. A energia térmica é utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para processos, ou indiretamente na produção de vapor ou na produção de frio.

4.5. Ciclo de Cogeração com Turbinas a Gás

4.5.1. Energia na Exaustão das Turbinas a Gás

Na saída da turbina a gás, os gases de exaustão apresentam ainda uma temperatura relativamente elevada, da ordem de 380 a 600°C. Estes gases possuem um elevado conteúdo energético, da ordem de 50 a 70% da energia contida no combustível.

A cogeração se baseia no aproveitamento de parte desta energia térmica. Dependendo das características da carga térmica, o aproveitamento pode ser maior ou menor. Os processos que utilizam temperaturas mais baixas podem aproveitar mais energia residual dos gases de exaustão.

Os usos mais freqüentes para esta energia são a utilização dos gases quentes para secagem, geração de vapor através de uma caldeira de recuperação, aquecimento de fluido térmico, condicionamento ambiental, etc.

4.5.2. Cogeração com Turbina a Gás

Corresponde a uma instalação de cogeração onde uma turbina a gás aciona um gerador que produz energia elétrica (já visto na seção 7.1) que alimenta a fábrica que hospeda a instalação. Os gases quentes da saída da turbina produzem vapor em uma caldeira de recuperação que alimenta a fábrica com esta utilidade.

5. Componentes

5.1. Compressor

A compressão do ar é a primeira etapa do processo que ocorre dentro de uma turbina a gás. O compressor é o responsável por capturar ar atmosférico, em pressão e temperatura ambientes, e comprimi-lo antes de injetá-lo no combustor, onde a queima é realizada na presença de combustível. A quantidade de ar e de combustível no combustor deve ser estabelecida de forma correta a fim de promover uma queima eficiente. Neste sentido, o compressor tem a responsabilidade de fornecer a vazão de ar comprimido necessária regulando a vazão de entrada de ar atmosférico. A manipulação da vazão de ar que entra é realizada pelo sistema de controle, que atua nas palhetas localizadas na entrada do compressor, chamadas de IGV (InletGuideVanes), e que são

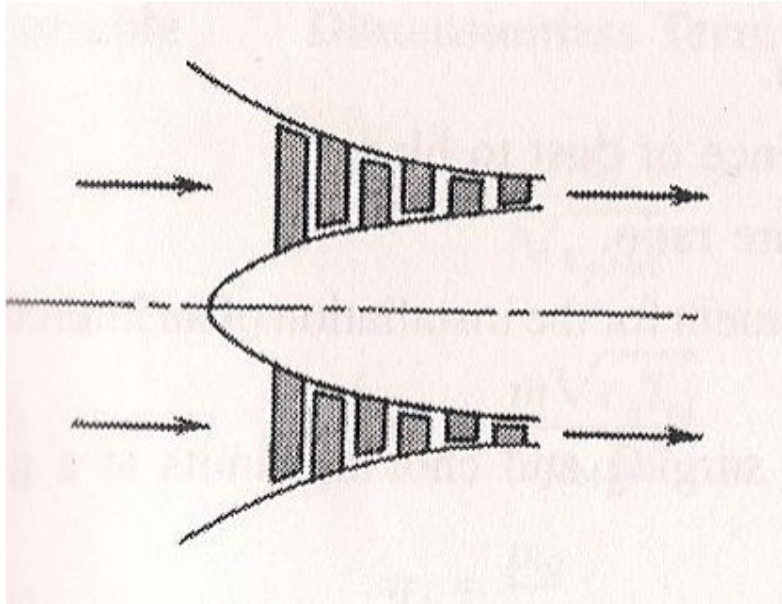
capazes de modificar seu ângulo de abertura. A Figura 14 ilustra a entrada de um compressor com suas IGVs.

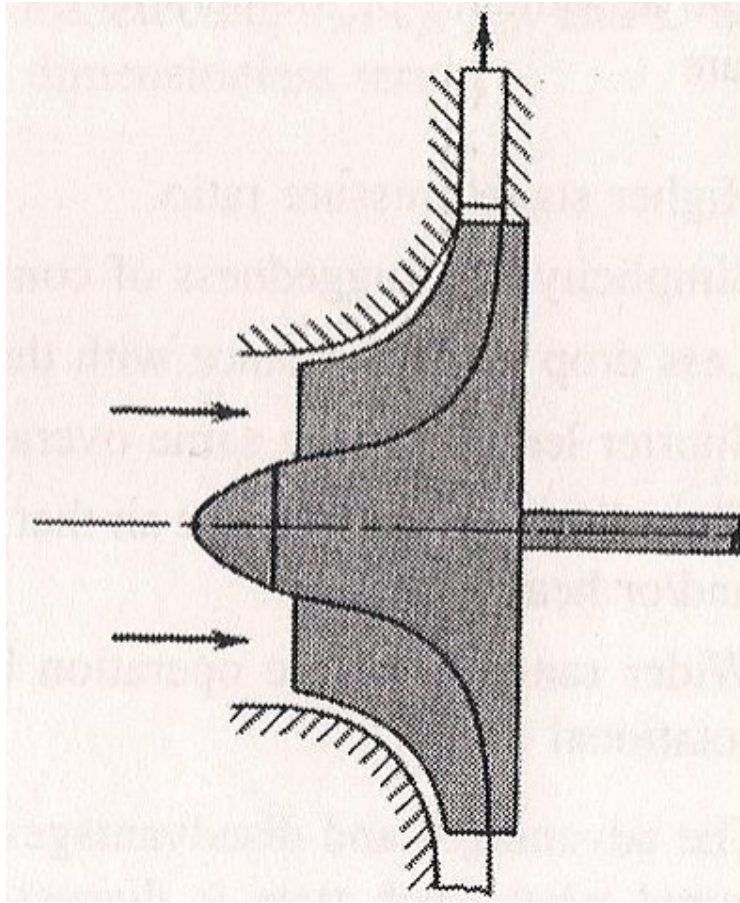
Quanto maior a razão de compressão de um compressor, maior será a eficiência da turbina a gás. Dessa forma, a inovação deste componente tende a ser contínua, sendo sempre limitada pela tecnologia e limites físicos dos materiais utilizados no momento de sua construção. Atualmente já é possível atingir razões de compressão da ordem de 30:1 (COHEN, ROGERS e ARAVANAMUTTOO, 1996).



O principal desafio para se construir um bom compressor é fazer com que ele seja eficiente e aerodinamicamente estável para todos os pontos de operação de uma turbina a gás, pois nem sempre ela estará operando em carga máxima. Existem dois tipos de compressores que conseguem atingir os objetivos previamente citados: compressor axial, mostrado na Figura 15 e o compressor radial, mostrado na Figura 16. No compressor axial, o fluxo segue um caminho praticamente paralelo ao eixo de rotação e há múltiplos estágios de compressão para conseguir alcançar a razão de compressão desejada. Cada estágio de um compressor axial é formado por uma fileira de palhetas rotativas, chamada rotor, seguida por uma fileira de palhetas fixas, chamada estator. Já o compressor radial redireciona o fluido de trabalho para um caminho paralelo ao raio do seu rotor e seus estágios são formados por um rotor centrífugo e um

difusor. Normalmente, compressores axiais podem vir a ter até 19 estágios enquanto os compressores radiais tem apenas 1 ou 2 estágios (GIAMPAOLO, 2006).





De acordo com (BATHIE, 1996), cada tipo de compressor tem suas vantagens. O compressor axial apresenta uma menor área frontal para uma determinada vazão de massa, possui uma direção de saída mais propícia à implantação de vários estágios de compressão e é mais eficiente para razões de pressão altas. O compressor radial apresenta maior razão de pressão para cada estágio de compressão, construção simples e robusta, menor perda de desempenho devido à aderência de sujeira nas lâminas, menor comprimento para uma dada razão de pressão, possui uma direção de saída favorável a instalação de um intercooler ou trocador de calor e uma gama maior de condições de operação para uma dada velocidade de rotação sem comprometer a estabilidade do mesmo.

5.2. Câmara de Combustão

Este componente é o responsável pelo aumento da energia interna do fluido de trabalho através da queima do mesmo após a mistura com o combustível. O desenvolvimento da câmara de combustão é bastante complexo e muitas vezes é

chamado de "arte negra" (GIAMPAOLO, 2006). O fato de a turbina a gás operar em pontos de operação muito distintos prejudica a construção de uma câmara de combustão eficiente, compacta e de baixa emissão de poluentes.

Segundo (BATHIE, 1996), os principais requisitos para uma câmara de combustão são:

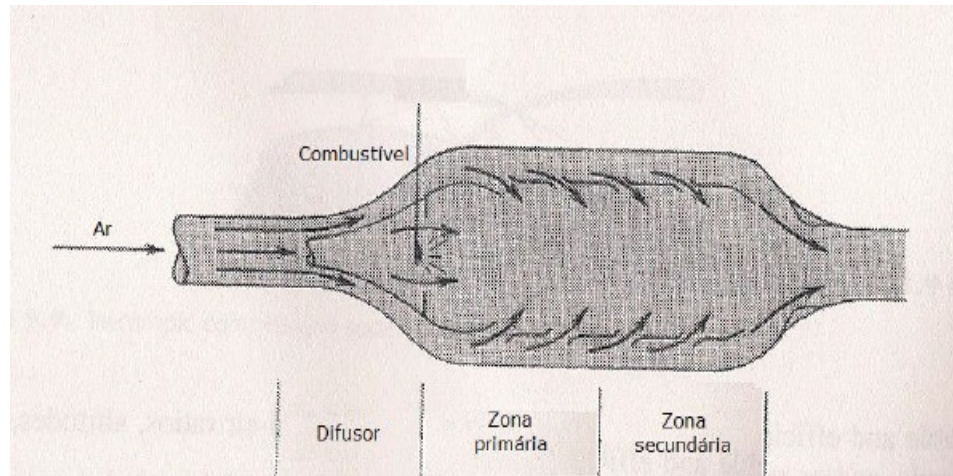
- . Liberar a energia química contida no combustível no menor espaço possível (comprimento e diâmetro);
- . Ter a menor perda de pressão possível dentro do espectro de operação do sistema;
- . Operação estável e eficiente para uma gama de razões ar-combustível, altitudes, velocidade de voo (em caso de aeronaves) e potência gerada;
- . Ser completamente confiável por, no mínimo, um tempo igual ao tempo de inspeção da máquina;
- . Ter a capacidade de ser reacendida durante um voo;
- . Ter uma boa distribuição de temperatura desde a entrada até a saída, onde os gases aquecidos entrarão na turbina;
- . Possuir baixa emissão de poluentes.

Uma câmara de combustão tradicional possui três partes: o difusor, a zona primária e a zona secundária, como mostrado na Figura 16. O difusor é a zona compreendida entre a saída do compressor e a entrada do combustor. Nessa região, a velocidade do fluido que sai do compressor deve ser reduzida, uma vez que a perda de pressão é função do quadrado da velocidade e tal perda acarreta em uma menor eficiência da máquina.

A zona primária é responsável por múltiplas funções, sendo as principais a injeção de combustível e a ignição da mistura ar-combustível. A injeção de combustível deve ser feita de modo a formar uma mistura uniforme e bem distribuída em qualquer ponto de operação do sistema. Também se deve tomar cuidado com o tamanho das partículas de combustível que são injetadas na câmara, pois o tamanho delas é regulado pela pressão de combustível. Se as partículas foram muito pequenas, elas não se

distribuirão corretamente na corrente de ar e se, por outro lado, elas forem relativamente grandes, o tempo de evaporação aumenta. Os dois casos acarretam uma combustão pobre, resultando em menor eficiência da máquina.

Na zona secundária, os gases provenientes da queima têm a temperatura reduzida a um patamar adequado para entrar na turbina e, além disso, são misturados para uniformizar a temperatura na saída da câmara de combustão.

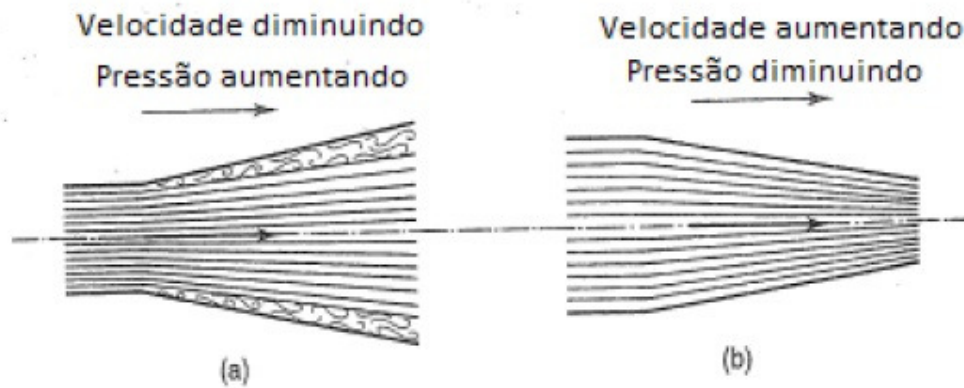


5.3. TURBINA

A turbina é bastante similar ao compressor, porém nela ocorre o processo inverso, ou seja, o fluido de trabalho sofre uma expansão, fazendo-a girar. A turbina, assim como o compressor, também é formada por estágios que consistem de um rotor e um estator. O número de estágios de expansão é sempre menor que o número de estágios de compressão para evitar a separação do fluido de trabalho, pois na compressão ele é desacelerado, enquanto que na expansão há uma aceleração do mesmo.

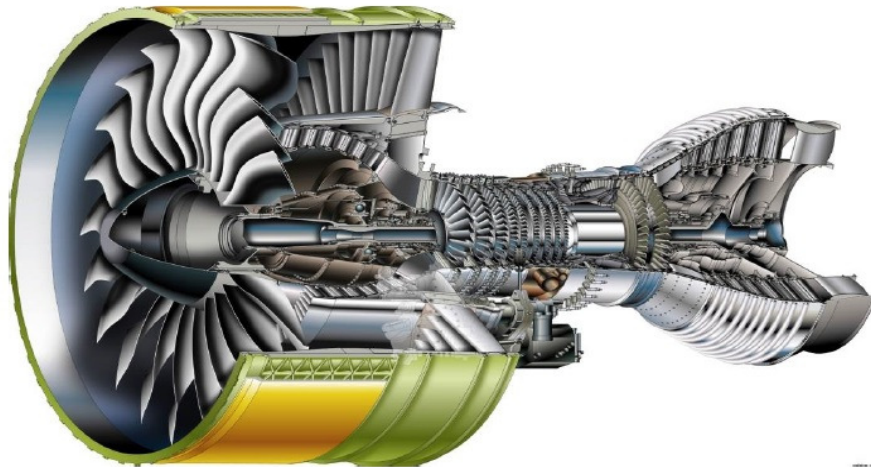
O princípio de Bernoulli enuncia que se a velocidade de uma partícula de um fluido aumenta enquanto escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão do fluido diminui. Caso a velocidade diminua, a pressão aumentará. Dessa forma, quando um fluido é desacelerado, como na Figura 18a, ocorre uma difusão do mesmo, levando a um aumento de pressão estática. Se esse aumento de pressão for muito grande, é possível que o sentido do escoamento seja invertido, já que o fluxo está em um sentido oposto ao gradiente de pressão, o que culmina na necessidade de muitos estágios no

compressor com uma pequena elevação de pressão em cada um. Na aceleração de um fluido, como na Figura 18b, o fluxo passa a estar no mesmo sentido do gradiente de pressão, por isso é possível aumentar a diferença de pressão entre cada estágio da turbina em relação ao compressor. Assim, uma turbina com poucos estágios pode facilmente acionar um compressor com muitos estágios.



Assim como os compressores, as turbinas podem ser radiais ou axiais. Contudo, as turbinas radiais são empregadas em pouquíssimos casos como quando se deseja gerar uma potência muito baixa ou quando se prefere compactidade a desempenho.

As turbinas axiais são as mais utilizadas nas turbinas a gás e consiste de um ou mais estágios de expansão. Esse tipo de turbina possui velocidade de escoamento do fluido de trabalho significativamente superior a um compressor axial, com uma maior variação de entalpia por estágio. Na Figura 19 pode-se ver uma turbina a gás completa, com o compressor à esquerda, a câmara de combustão no meio e a turbina com dois estágios de expansão à direita.

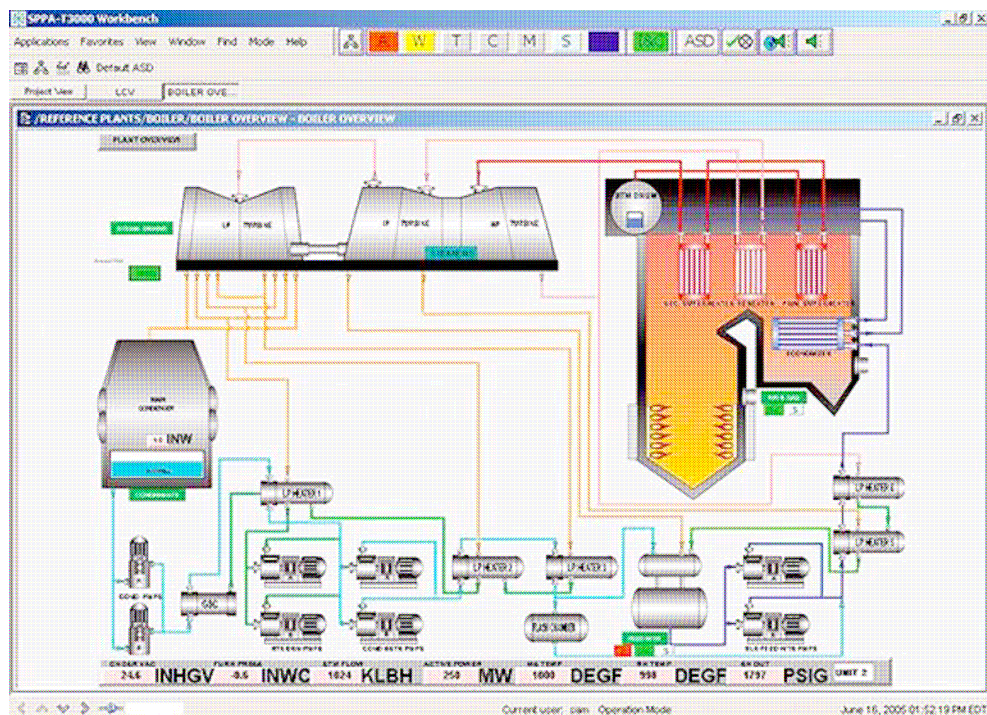


6. Partida

A partida de uma turbina a gás compreende todo o intervalo entre o momento em que é lançado um comando para partir e o momento em que se atinge a velocidade de regime (ou velocidade de sincronização), e é certamente uma das etapas mais desafiadoras e problemáticas de sua operação. Assim como na parada, na mudança de carga e em outros cenários com distúrbios, o sistema encontra-se trabalhando no regime transitório, bem distante do ponto de operação. Isso acarreta algumas dificuldades extras, especialmente no caso do compressor, que pode vir a trabalhar de maneira instável em decorrência de fenômenos conhecidos como *stalle surge*. As consequências provocadas por esses fenômenos podem ser refletidas em perda de eficiência, danos severos ao equipamento e até no comprometimento da própria segurança dos operadores. Perdas econômicas certamente ocorrem, pois se tais condições não levarem ao *trip*, isto é, ao desligamento do aparelho, ao menos diminuem a eficiência. Por isso, toda turbina a gás, operando em ciclo simples ou combinado, possui um rígido sequenciamento de partida, organizado em etapas que neste trabalho serão chamados de *passos*, e que devem ser obrigatoriamente cumpridos em vias de se chegar ao regime permanente.

Em geral, os procedimentos de partida das turbinas a gás são bem parecidos, envolvendo muitos passos em comum, embora possa certamente haver algumas diferenças em consequência das suas características, como configuração dos eixos, potência e ciclo operativo. Os passos envolvem basicamente checagens de sistemas

auxiliares, de segurança ou de itens da própria turbina e podem representar também ações de controle para os mesmos sistemas, quase sempre em malha aberta. Em uma usina termelétrica, tudo isso é monitorado e controlado por um sistema supervisor. Em geral, as próprias fabricantes de turbinas fornecem também a instrumentação e o controle, assim como o software. A Siemens, por exemplo, possui o SPPA-T3000 (do inglês, *Siemens Power and Process Automation T3000*), que, segundo a empresa, é capaz de realizar o “controle da turbina, o controle e a proteção da caldeira, o balanço da planta (do inglês, *BOP*) e a integração com outros sistemas” (SIEMENS). A GE, por sua vez, oferece o OC 6000e (GE), com a mesma proposta do anterior. A Figura 20 ilustra uma tela do SPPA-T3000.



6.1. O compressor na partida

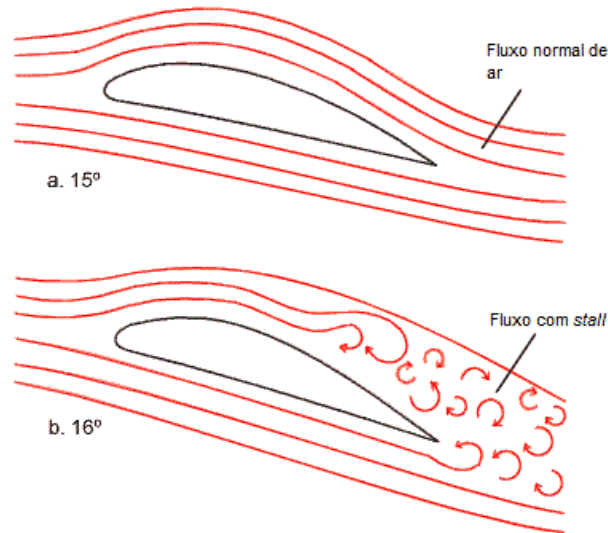
O compressor é um caso peculiar na partida. Seu trabalho, como um todo, é antinatural: comprimir ar é muito mais difícil que fazê-lo expandir. Para realizar sua tarefa, o compressor requer trabalho, enquanto que o expensor o produz. Por isso, um ponto importante na partida e igualmente importante na história da evolução das turbinas a gás é o momento em que a quantidade de trabalho gerado é igual à quantidade de trabalho consumido. A partir desse momento a turbina a gás se torna autossuficiente.

6.1.1. Fenômenos de instabilidade

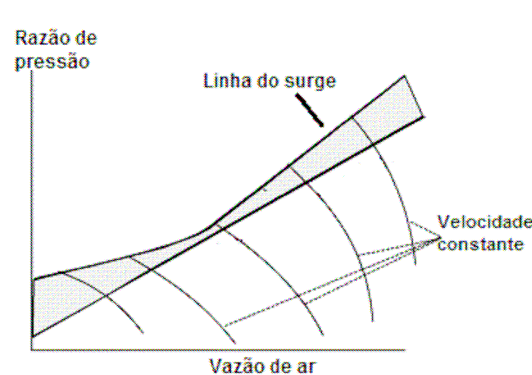
Devido à operação fora do ponto de projeto, o compressor está sujeito a alguns fenômenos indesejáveis. Em geral, compressores axiais desenvolvidos para operar no regime de uma usina termelétrica exibem desempenho ruim em baixas rotações, apresentando vibrações, baixa eficiência e baixa razão de pressão (KIM, SONG, *et al.*, 2002).

Um fenômeno comum na partida é o *stall*. O ar que entra no compressor deve ser guiado pelos seus múltiplos estágios através das palhetas dos rotores e estatores consecutivos, até ser encaminhado à câmara de combustão sob alta pressão. O ponto a ressaltar é que o fluxo de ar deve permanecer rente às palhetas no caminho até o combustor; se isto não ocorre e o ar descola da sua superfície, diz-se que ocorreu *stall*. Esse fenômeno pode ser provocado pelo aumento do ângulo de incidência do fluxo de ar nas palhetas e é muito comum na partida, quando os estágios do compressor ainda não estão recebendo a vazão de ar normal de operação. Em geral, os estágios mais afetados são os de alta pressão, mais próximos à câmara de combustão.

A Figura 21 mostra a diferença entre o fluxo normal nas palhetas e o fluxo com *stall*. O descolamento do ar causa perda de eficiência na operação do compressor, mas em pequenas proporções é aceitável. Entretanto, quando ocorre um *stall* severo ou abrupto, o fluxo no interior do combustor pode se tornar inaceitavelmente turbulento. Na prática, essa condição pode levar a um fenômeno muito mais perigoso, conhecido como *surge*. Neste caso, a vazão de ar pode se tornar instável dentro do compressor, havendo inclusive um retorno do fluxo de estágios de alta pressão ou mesmo do combustor para estágios de mais baixa pressão. Este fluxo inverso é altamente prejudicial ao equipamento, podendo inclusive destruí-lo caso os gases superaquecidos a temperaturas próximas de 1250°C (GASNET) da câmara de combustão sejam jogados para o compressor.



A Figura 22 mostra de modo qualitativo os limites de operação para o surge. A área cinza é delimitada pela linha do *surge*, acima da qual a operação deve ser evitada, e pela linha normal de operação do compressor, que deve manter uma distância de segurança da linha do *surge*. As linhas de velocidade de rotação constante mostram que à medida que a razão de pressão do compressor aumenta e a vazão de ar diminui, o *surge* torna-se mais próximo.



O *surge* causa um aumento da temperatura de descarga do fluxo de ar, ruídos e vibrações excessivas no compressor, tanto axiais quanto radiais (TULIO, 2006). Técnicas de controle *anti-surge* incluem o controle de abertura das IGVs na entrada do compressor e a disposição de válvulas para escapamento de ar, chamadas de válvula de *blow-off*. Em um compressor axial de múltiplos estágios, pode haver válvulas em estágios de baixa pressão, alta pressão e pressão intermediária, sendo que as mais comuns são as de alta e baixa pressão.

6.2. O procedimento de partida

Antes de entrar em operação, a turbina a gás pode estar totalmente parada ou, por questões inerciais, em lenta rotação constante. Quando a turbina requer esta última condição, ela deve ser acoplada a um motor auxiliar chamado de *turning gear* (ou *jacking gear*), que é responsável por mantê-la girando a velocidades muito baixas.

A partida de uma turbina a gás inicia-se com a checagem dos sistemas auxiliares necessários ao seu funcionamento. Inicialmente, há verificações no sistema de lubrificação e acionamento do sistema de refrigeração, seguido pela verificação de pressão do óleo (LANG, 1985).

Em velocidade de regime, a turbina a gás é a própria responsável pelo seu movimento. Na partida, no entanto, ela é incapaz de se sustentar, o que torna necessária a existência de um equipamento auxiliar durante o processo. É então acoplado ao seu eixo um novo motor, diferente do de *turning gear*, através de uma caixa de reduções. Este motor é chamado de motor de partida e pode ser elétrico de corrente contínua, corrente alternada, a diesel ou mesmo outras turbinas menores (Razak, 2007, Kim, Song, Kim, & Ro, 2002). Sua função é elevar a velocidade de rotação do compressor até patamares em que a combustão no combustor seja capaz de se autossustentar (COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996). Este valor encontra-se na faixa entre 40% e 85% da velocidade de sincronia (KIM, SONG, *et al.*, 2002). Em uma usina termelétrica, o acoplamento em eixo único da turbina com o gerador gera a necessidade de aceleração conjunta dos dois equipamentos e grandes unidades de partida se fazem necessárias. Uma unidade de 150MW de potência, por exemplo, pode requerer um sistema de partida da ordem de 5MW de potência (COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996).

Após o acoplamento, o motor de partida eleva a velocidade de rotação da turbina a gás a patamares entre 15% a 30% da velocidade de regime, quando se tem início a purga, processo em que é eliminado qualquer resíduo de mistura ar-combustível que possa estar presente no combustor ou em outras partes da turbina a gás desde o momento de sua parada anterior. Essa etapa é importante, pois a existência de tais resíduos pode causar ignição descontrolada em contato com o fluxo de ar, além de danificar os componentes. Seu tempo de duração varia de acordo com a turbina e de acordo com o tempo de inatividade anterior à partida, podendo compreender valores

entre 1 e 10 minutos (WALSH e FLETCHER, 2004). O tipo de partida depende essencialmente da temperatura medida nas cavidades existentes entre os rotores e estatores da turbina, que são chamadas de *disk cavities*. Acima de determinada temperatura pré-estabelecida, ocorre uma partida a quente e abaixo dessa temperatura ocorre uma partida a frio. O tempo de purga de uma partida a quente é menor que a purga de uma partida a frio.

Em casos de *tripe* posterior reinício do procedimento de partida, a purga deve ser novamente realizada. A rotação da turbina a gás permanece praticamente constante durante todo o processo.

Após a purga bem sucedida, é iniciado o processo de ignição no combustor. Segundo (LORA e NASCIMENTO, 2004), pode haver uma pequena queda na velocidade atingida na purga para se chegar a uma velocidade ótima para a ignição, que tipicamente ocorre entre 10% e 20% da velocidade de operação (KIM, SONG, *et al.*, 2002).

A ignição é um processo essencial e crítico na partida. Uma falha geralmente causa um *trip*. A vazão de entrada de ar pressurizado do compressor para o combustor deve ser adequada, assim como a quantidade de combustível injetada. Existem relações ar-combustível ótimas próprias para a partida – diferentes da relação para operação em regime – e os procedimentos variam conforme as características do combustor, do combustível e das propriedades do ar utilizado como fluido de trabalho. O procedimento é seguido por checagens de chama realizadas por sensores de temperatura geralmente localizados no expensor, já que as temperaturas alcançadas no combustor dificultam a alocação de sensores no local.

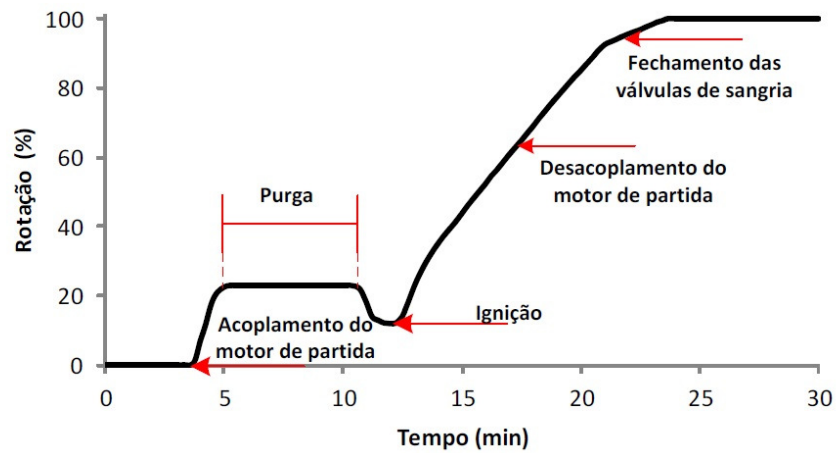
Após a ignição, a queima de combustível e o motor de partida elevam a velocidade de rotação da turbina até um ponto de autossustentação. Valores típicos giram em torno de 60% da velocidade de operação (KIM, SONG, *et al.*, 2002). A administração de uma correta taxa de injeção de combustível e a determinação do momento preciso em que a turbina torna-se autossustentável são fundamentais nesta etapa. Caso o motor de partida seja desacoplado antes que a turbina possa se sustentar, ocorre um *trip* conhecido como *hot start*: a rotação desacelera e a temperatura no combustor aumenta drasticamente (KIM, SONG, *et al.*, 2002). Esse fenômeno ocorre como consequência da estratégia de controle de aumentar a vazão de combustível no

combustor para incrementar a velocidade de rotação. O objetivo não é alcançado porque a turbina não se encontrava de fato autossustentável.

Ainda com o motor de partida acoplado, a turbina a gás pode inicialmente ser encaminhada a um ponto intermediário, conhecido como de velocidade subsíncrona, localizado tipicamente entre 40% e 60% da velocidade de sincronização (RAZAK, 2007). Nesse momento, o sistema permanece ocioso e realiza-se um ajustamento térmico dos componentes, importante para minimizar o seu estresse térmico e prolongar a vida útil do equipamento (RAZAK, 2007). Esse procedimento também pode ser realizado após o atingir o regime, já sem o motor de partida.

Se o motor de partida for desacoplado corretamente, a turbina encaminha-se para a velocidade de operação. As válvulas de sangria do compressor, que são válvulas que se comunicam com a turbina e são utilizadas para resfriar suas palhetas, devem ser fechadas entre 70% e 90% da velocidade de operação e as IGVs, mantidas fechadas durante todo o procedimento, podem ser abertas após 70% da velocidade de operação ou mesmo somente ao chegar em 100% da velocidade de operação que, uma vez atingida, permite a ligação do gerador à rede elétrica através de seus disjuntores. Ao atingir a velocidade de sincronia, o procedimento de partida é finalizado e a turbina passa a operar em regime permanente.

A Figura 23 mostra um típico comportamento da velocidade de rotação durante a partida. Através da visualização do gráfico, não é possível perceber, a princípio, se a turbina opera com o motor *turning gear*. O momento do acoplamento do motor de partida, no entanto, é nítido pela aceleração. Logo após se dá a purga, seguida pela queda de velocidade, cujo mínimo local obtido é precisamente o momento da ignição. Posteriormente, a elevação da velocidade se dá de modo aproximadamente linear até a velocidade de sincronia, quando a turbina estabiliza e entra em regime permanente. Apesar da aparente simplicidade, essa é a parte mais crítica e exigente de todo o procedimento: é nela que o sistema está mais suscetível aos fenômenos de instabilidade do compressor e é também onde ocorre o desacoplamento do motor de partida e o fechamento das válvulas de sangria.



7. Rendimento

O rendimento da turbina a gás está ligado diretamente aos máximos valores de temperatura dos gases que se conseguir na saída da câmara de combustão. Esta temperatura será denominada de PTET (Power Turbine EnterTemperature). Quanto maior for a PTET, maior será a energia cinética disponível para ser transformada em trabalho nas palhetas da turbina. O grande problema tecnológico atual é obter-se um tipo de material que resista a essas temperaturas, que são da ordem de 2000°C. Esta temperatura pode ser aumentada em função do débito de combustível que se queima na câmara de combustão. Através de um sistema de resfriamento de palhetas, ciscos e diafragmas, bem como superfícies de irradiação de calor e ventilação da carcaça do isolamento acústico, tem-se obtido condições para que os materiais existentes suportem de 1500°C a 2000°C.

Outros componentes afetam o rendimento; o compressor, a turbina, os dutos, o resfriamento entre estágios de compressão.

Quanto mais eficiente é um compressor, maior é a sua pressão de saída para um mesmo trabalho recebido em seu eixo. As compressões mais eficientes são as isotérmicas e exigem resfriadores entre os estágios.

Isso torna a instalação muito complexa e experimentalmente mostrou ser pouco aconselhável.

Da mesma forma na turbina, obtém-se maior eficiência, quanto maior for o trabalho mecânico por ela fornecida para uma mesma energia cinética recebida.

Com relação aos dutos, passagens e carcaças, há perdas de energia por atrito no escoamento, condução de calor para o exterior por deficiência do isolamento térmico e turbulência no crescimento de dutos de forma diferente do ideal.

Na turbina Olympus TM3B, turbina esta que equipou a já “baixada” Fragata o de movimentar os seus compressores. Temos, portanto um rendimento ainda baixo. Além disso, em função das limitações do material somos obrigados a diluir a mistura ar combustível a proporções de 250kg de ar para 1kg de combustível.

Considerações Finais

Com o exposto acima espero que o(s) leitor(es) tenha se maravilhado com este equipamento, devido ao fato de se mostrar uma verdadeira máquina a qual pode ser usada em diversas ocasiões. A turbina se mostra ser sempre pronta a atender todas as exigências do usuário com a máxima perfeição para a qual foi designada. Temos como exemplo, as turbinas empregadas em aviões de combate, ou seja, as turbinas a jato, as quais possibilitam as aeronaves fazerem “manobras” e movimentos fantásticos durante seu voo.

A aplicação dessas turbinas também é vista na propulsão naval, para navios de combate, onde é necessário maior velocidade, para ataque ou pra “fuga”. Porém uma das aplicações mais usuais é na geração de energia. Como foi apresentado, a turbina é aplicada em termelétricas, plataformas em outros meios para geração de eletricidade, porém também temos a cogeração, instrumento esse que usaremos a energia, em forma de calor, da descarga da turbina e aqueceremos um fluido para aplicarmos em outras áreas.

O desenvolvimento dessa máquina foi a partir do momento em que os motores alternativos, mesmo com todos avanços, nos materiais, combustível e na eletrônica, não

foram capazes de fornecer a quantidade de rotação que a turbina pode gerar com uma contínua faixa de queima.

Referências Bibliográficas

ASME. #135 Neuchâtel Gas Turbine. **ASME**. Disponível em: <[http://www.asme.org/about-asme/history/landmarks/topics-a-l/electric-power-production-steam/-135-neuchatel-gas-turbine-\(1939\)>](http://www.asme.org/about-asme/history/landmarks/topics-a-l/electric-power-production-steam/-135-neuchatel-gas-turbine-(1939)>). Acesso em: 02 jul. 2014

BATHIE, W. W. **Fundamentals of Gas Turbines**. Segunda. ed.[S.l.]: John Wiley & Sons, 1996.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. The World Factbook. **Central Intelligence Agency**. Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2232rank.html>>. Acesso em: 30 jun. 2014.

CLEYNEN, O. File: Fan blades and inlet guide vanes of GENx-2B.jpg. **Wikimedia Commons**, 2011. Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AFan_blades_and_inlet_guide_vanes_of_GENx-2B.jpg>. Acesso em: 4 jul. 2014.

COHEN, H.; ROGERS, G. F. C.; SARAVANAMUTTOO, H. I. H. **Gas Turbine Theory**. Londres: Longman, 1996.

DAY, J. **Engines - The Search for Power**. [S.l.]: [s.n.], 1980.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2012 - Resultados Preliminares - Ano-base 2011**. Rio de Janeiro. 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2012: ano base 2011**. Rio de Janeiro. 2012.

FOLHA DE SÃO PAULO. Nível dos reservatórios do Sudeste alcançará 54,2% no fim de março, diz ONS. **Folha de São Paulo**, 25 fev. 2013. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/1236448-nivel-dos-reservatorios-do-sudeste-alcancara-542-no-fim-de-marco.shtml>>. Acesso em: 04 jul. 2014.

GASNET. Termelétricas - Ciclo combinado. **Gasnet**. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_termeletricas/ciclo.asp>. Acesso em: 10 jul. 2014.

- GIAMPAOLO, A. **Gas turbine handbook: principles and practices**. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- HODGE, B. K. **Sistemas e Aplicações de Energia Alternativa**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- HUNT, R. J. **The History of the Industrial Gas Turbines**.IDGTE.Morpeth. 2011.
- LANG, R. P. **Sawyer's Gas Turbine Engineering Handbook: Selection & Application**. Terceira. ed. Connecticut: [s.n.], v. 2, 1985.
- LORA, E. E. S.; DO NASCIMENTO, M. A. R. **Geração Termelétrica - Planejamento, Projeto e Operação**. Rio de Janeiro: Editora Interciencia, v. 1, 2004.
- LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. D. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 2, 2004.
- MCNEIL, I.**An Encyclopedia of the history of technology**.Londres: Routledge, 1990.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Gestão da Comercialização de Energia - Leilões de Energia**. [S.l.]. 2013.
- MORAN, M. J. **Engineering Thermodynamics**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- NFL. Aerodynamics: Angle of Attack. **The NFL Squadrons: Air Warrior** HomePage, 26 jul. 1998. Disponível em: <<http://airwarrior.afkamm.co.uk/Aerodynamics/aero3.shtml>>. Acesso em: 17 jul. 2014.
- RAZAK, A. M. Y. **Industrial Gas Turbines: Performance and Operability**. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- WALSH, P. P.; FLETCHER, P. **Gas Turbine Performance**.Segunda. ed. [S.l.]: Blackwell Science, 2004.
- WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- http://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina_a_g%C3%A1s. Acesso em: 25 jun. 2014.