

PREFÁCIO

Esse curso tem o objetivo de fornecer aos participantes noções básicas sobre os turbocompressores utilizados nas plataformas da UN-BC.

A partir deste curso os participantes poderão ter acesso aos treinamentos de familiarização específicos para cada tipo de turbocompressor de maneira mais fácil, permitindo um melhor entendimento que possa conduzi-los no futuro à operação e manutenção desses equipamentos.

Permitirá também aos gerentes e supervisores das unidades que operam e mantêm esses equipamentos, conduzirem os trabalhos de acompanhamento e análises de relatórios relacionados à operação e manutenção dos turbocompressores de uma maneira mais fácil e objetiva.

Agradecemos a todos que direta ou indiretamente colaboraram para realização desse trabalho e estamos ao inteiro dispor para sugestões e esclarecimentos.

Macaé, 08 de outubro de 2002

José Guilherme Monteiro Paixão
Consultor Técnico
Mat. 154041.9
Correio: JM65 – Notes
UN-BC/ATP-S/TURBOMÁQUINAS
e-mail: jose_guilherme@petrobras.com.br

**“NÃO TENHAM MEDO DE APRENDER. O CONHECIMENTO É LEVE.
É UM TESOURO QUE SE CARREGA FACILMENTE.”**

Brian Dyson

ÍNDICE

	PÁG.
TURBOCOMPRESSORES	
- FINALIDADE E PRINCIPAIS COMPONENTES	2 a 3
TERMODINÂMICA BÁSICA	
- EFEITO DIFUSOR E EFEITO BOCAL	4
- PROCESSOS DE COMPRESSÃO	5
TURBINAS A GÁS	
- INTRODUÇÃO	6 a 7
- PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	8
- COMPARAÇÃO ENTRE O CICLO BRAYTON E O CICLO OTTO	19
- TURBINA SOLAR TAURUS	10
SISTEMAS AUXILIARES DA TURBINA	
- SISTEMA DE PROTEÇÃO	11
- SISTEMA DE AR	11 a 12
- SISTEMA DE PARTIDA	12
- SISTEMA DE ÓLEO LUBRIFICANTE E ÓLEO DE COMANDO HIDRÁULICO	13
- SISTEMA DE CONTROLE DO FLUXO DE AR DO COMPRESSOR AXIAL	13
- SISTEMA DE GÁS COMBUSTÍVEL	14
- O CASULO DO TURBOCOMPRESSOR	14
CAIXA MULTIPLICADORA	14
COMPRESSORES CENTRÍFUGOS	
- INTRODUÇÃO	15
- PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	15
- COMPRESSOR CENTRÍFUGO DO TIPO VERTICAL (BARRIL)	16
SISTEMAS AUXILIARES DO COMPRESSOR CENTÍFUGO	
- SISTEMA DE PROTEÇÃO	17
- SISTEMA DE BALANCEAMENTO AXIAL	17
- SISTEMA DE SELAGEM	18
- SISTEMA DE ÓLEO DE SELAGEM	18
- PLANTAS DE PROCESSO DE COMPRESSÃO E GÁS COMBUSTÍVEL	19 a 20
CONTROLE DOS TURBOCOMPRESSORES	
- PAINEL DE CONTROLE DO TURBOCOMPRESSOR	21 a 22
- PAINÉIS AUXILIARES DO TURBOCOMPRESSOR	23
- SISTEMA DE CONTROLE ANTI-SURGE E CAPACIDADE	24 a 30
SEQÜÊNCIA BÁSICA DE PARTIDA	31
SEQÜÊNCIA BÁSICA DE PARADA	32
INSTALAÇÃO DE TURBOCOMPRESSORES	33
GUIA PARA LEVANTAMENTO DE DADOS DE TURBOCOMPRESSORES	34 a 37
DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE DAS TURBOMÁQUINAS	37 a 38
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	39

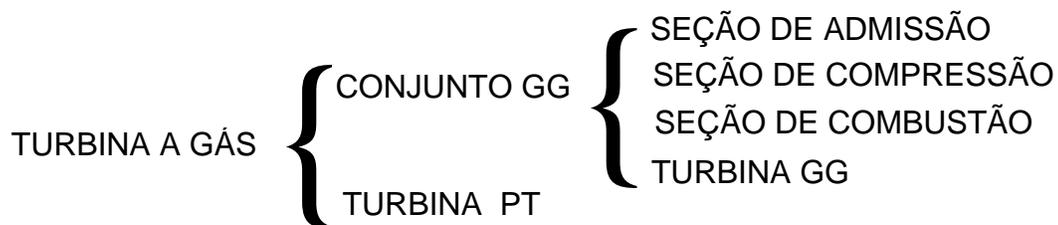
TURBOCOMPRESSORES

1- FINALIDADE

Nas plataformas de produção de petróleo, os turbocompressores têm a finalidade de promover o aproveitamento do gás natural através de um processo de compressão. Define-se como aproveitamento, a utilização do gás natural comprimido para elevação artificial (gás lift) em poços produtores de petróleo, gás combustível nas unidades de produção e escoamento para unidades terrestres afim de ser processado e comercializado para utilização residencial e industrial.

2- PRINCIPAIS COMPONENTES

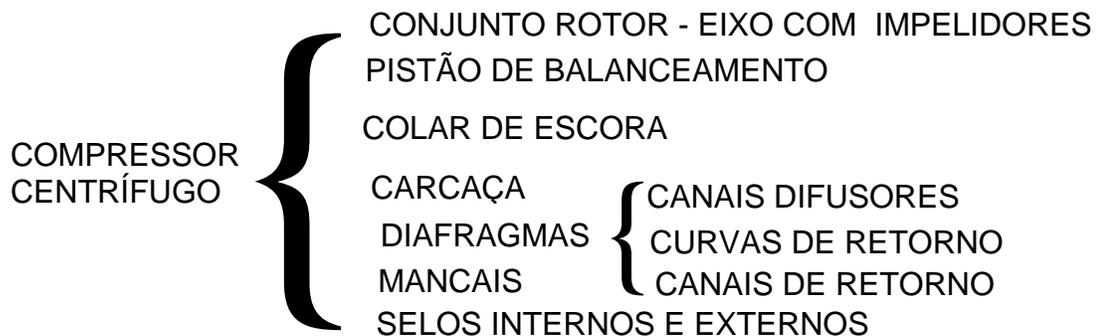
- **TURBINA A GÁS:** Máquina motriz. Retira a energia dos gases gerados na combustão, transformando a energia térmica em energia mecânica.



CONJUNTO GERADOR DE GÁS (GG): Gera gases (energia) para acionamento do compressor axial de ar e turbina de potência.

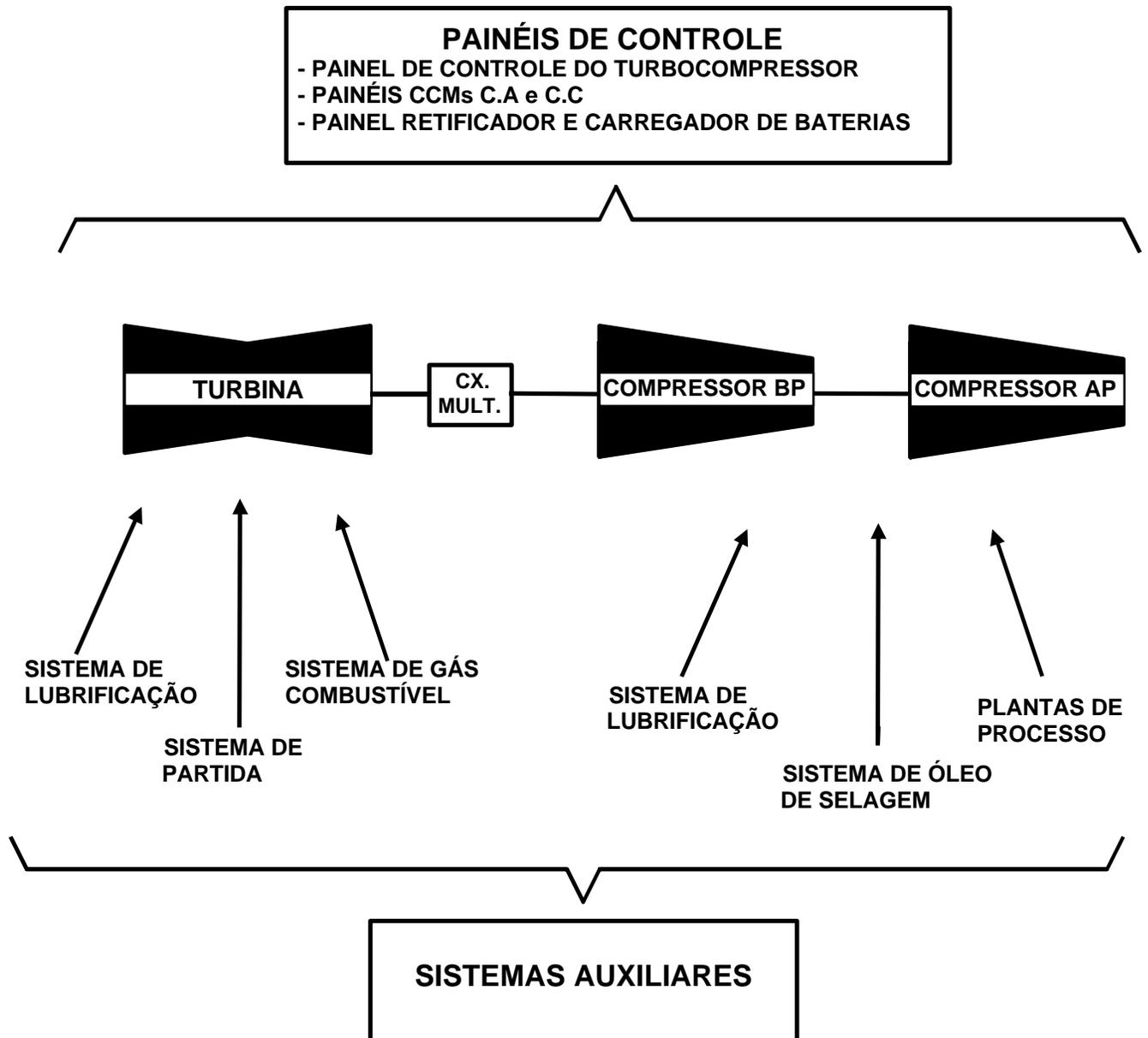
TURBINA DE POTÊNCIA (PT): Aciona os compressores centrífugos de gás natural através de uma caixa multiplicadora.

- **COMPRESSOR CENTRÍFUGO:** Máquina operatriz. Cede energia ao gás natural, promovendo o aumento de pressão e seu escoamento.



- **PAINÉIS DE CONTROLE:** Painel de controle do turbocompressor e painéis auxiliares (CCMs, retificadores/carregadores de baterias) dos turbocompressores. Esses painéis supervisionam e controlam a operação do turbocompressor.

- **SISTEMAS AUXILIARES:** São os diversos sistemas que auxiliam na operação dos turbocompressores, entre eles podemos citar os sistemas de proteção, ar, partida, óleo lubrificante, óleo de comando, gás combustível, segurança, óleo de selagem, plantas de processo, caixas de acessórios e multiplicadora, casulo.

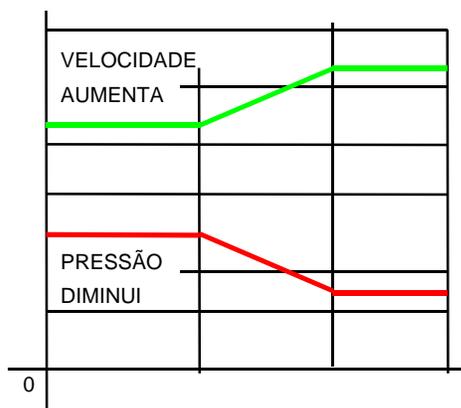
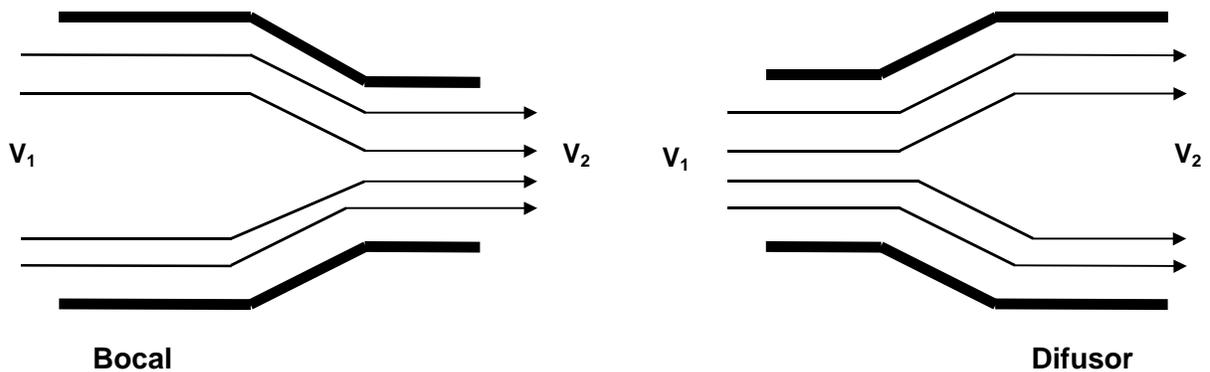


TERMODINÂMICA BÁSICA

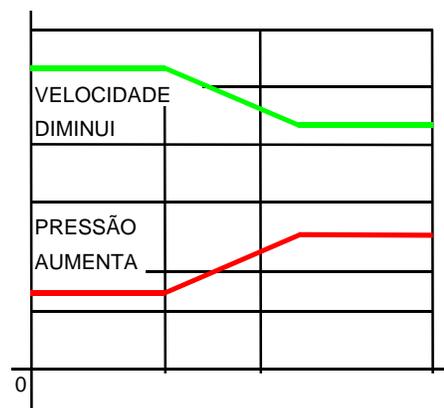
Para uma perfeita compreensão do princípio de funcionamento de um turbocompressor, definiremos a seguir, alguns conceitos de termodinâmica básica:

1- EFEITO DIFUSOR E EFEITO BOCAL (Fig. 1.0)

Para fluxo subsônico, ao se analisar o escoamento de um fluido numa tubulação, verifica-se que onde a seção transversal é aumentada, a velocidade é reduzida e vice-versa. Nessas situações, ao se analisar as energias do fluido, verifica-se que, se a energia de velocidade é aumentada, outro tipo de energia tem que ser reduzida, pois a soma das parcelas de energia de velocidade, pressão, altura e temperatura não se altera, com base na primeira lei da termodinâmica. Isso significa que o fato da redução ou ampliação da seção transversal da tubulação, na qual o fluido escoar, não provoca nenhuma variação de calor ou trabalho, mantendo-se constante a energia total. Como exemplo analisaremos o escoamento de um líquido numa tubulação em um mesmo plano horizontal, onde se tem uma redução da seção transversal.



EFEITO CONVERGENTE DO BOCAL



EFEITO DIVERGENTE DO DIFUSOR

— Velocidade
— Pressão

Fig. 1.0

2- PROCESSOS DE COMPRESSÃO

Existem vários processos para se aumentar a pressão de um fluido através de uma compressão:

- ♦ Isotérmico,
- ♦ Com resfriamento.
- ♦ Adiabático irreversível ou isentrópico.
- ♦ Politrópico.

Nos gráficos $P \times V$ (pressão x volume) e $T \times S$ (temperatura x entropia) podemos analisar os processos de compressão (fig. 1.1).

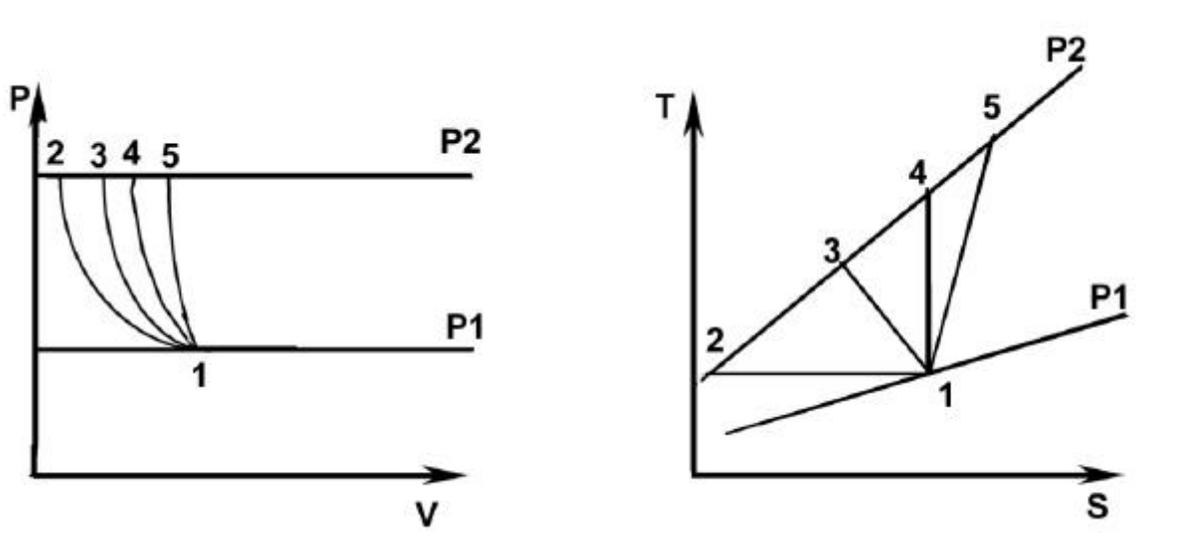


Fig. 1.1

O **processo 1 - 2** representa a compressão isotérmica, onde no gráfico $T \times S$ verifica-se que a temperatura é constante. Este processo só é possível em laboratório, efetuando-se uma compressão lenta. É o processo que demanda de menor trabalho para ser realizado, pois somente a energia de pressão é aumentada.

O **processo 1 - 3** representa uma compressão rápida com resfriamento. É empregada nos compressores alternativos, onde por meio de resfriamento dos cilindros se consegue reduzir o trabalho necessário para compressão.

O **processo 1 - 4** representa uma compressão adiabática irreversível ou isentrópica. Teoricamente é empregada para compressores dinâmicos (centrífugos e axiais). Na prática esses compressores efetuam o **processo 1 - 5** que é politrópico, pois a entropia inevitavelmente é aumentada.

TURBINAS A GÁS

1- INTRODUÇÃO

As turbinas a gás são essencialmente máquinas térmicas que utilizam o ar como fluido motriz para prover energia. Para conseguir isso, o ar que passa através das turbinas deve ser acelerado, isto significa que a velocidade ou energia cinética é aumentada. Para obter esse aumento primeiramente aumenta-se a pressão e em seguida adiciona-se calor. Finalmente a energia gerada (aumento de entalpia) é transformada em potência no eixo da turbina de expansão.

Em 1930 FRANK WHITTLE apresentou a primeira patente de uma turbina a gás para produzir um jato de propulsão (Fig. 1.2). A turbina WHITTLE formou as bases das modernas turbinas a gás.

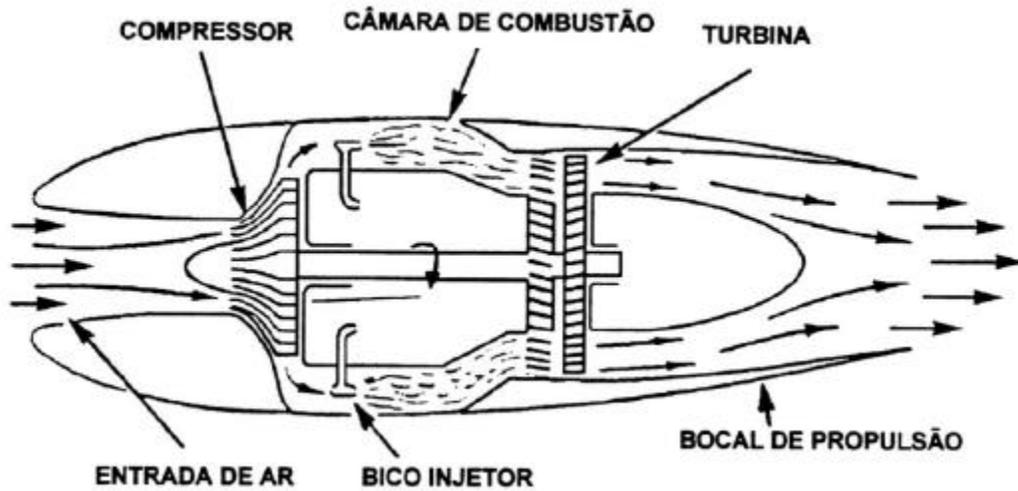


Fig. 1.2

Recentemente, turbinas a gás foram introduzidas em aplicações industriais. Neste meio, essas turbinas são denominadas geradoras de gás (GG). Seu propósito é a geração de um grande volume de gases de alta energia que escoam através de uma ou mais rodas de turbina transformando essa energia em potência no eixo.

As turbinas a gás são atualmente empregadas em sistemas de compressão de gás (fig.1.3), geração de energia elétrica e etc.

As turbinas industriais modernas se dividem basicamente em três categorias:

- ♦ Industriais porte pesado (heavy duty) - HISPANO SUIZA, NUOVO PIGNONE
- ♦ Industriais porte leve (Fig. 1.5) - SOLAR (Mars, Taurus, Centaur, Saturn), DRESSER
- ♦ Aeroderivadas - GENERAL ELETRIC LM 2500, ROLLS ROYCE AVON

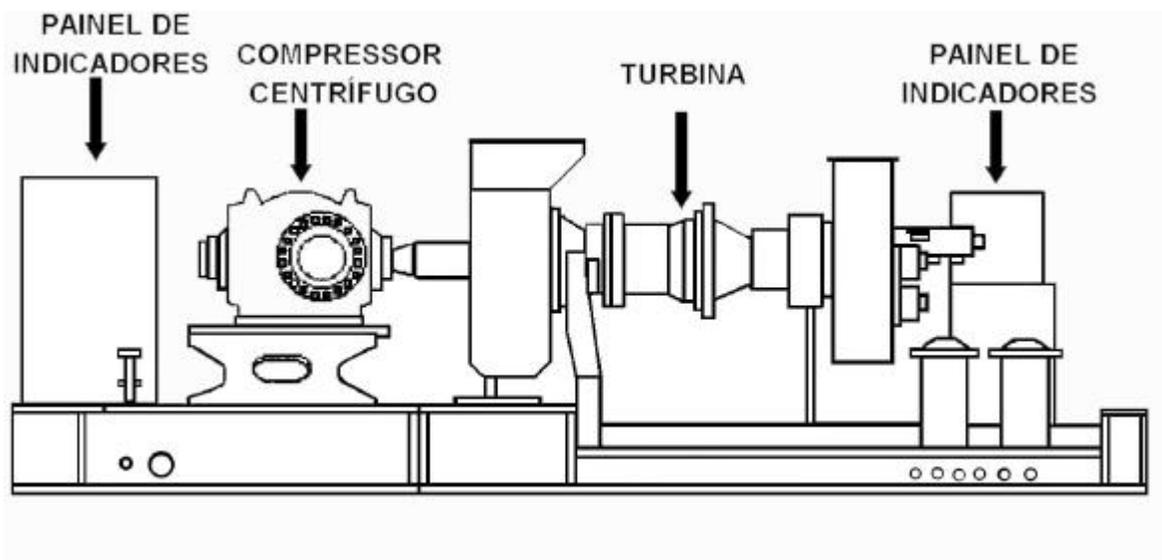


Fig. 1.3

2- PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Uma turbina a gás produz energia a partir do resultado das seguintes etapas contínuas do ciclo BRAYTON:

- **Admissão** - O ar atmosférico é admitido passando por uma seção de filtragem normalmente de três estágios.

- **Compressão** - O ar é comprimido em um compressor dinâmico (axial ou centrífugo), normalmente do tipo axial de vários estágios onde a energia de pressão e temperatura do fluido (ar) é aumentada.

O compressor de ar é o componente da turbina responsável pelo aumento da pressão do ar no ciclo Brayton e é acionado pela turbina do gerador de gás.

Os compressores axiais normalmente são empregados nesses casos por serem especificados para maiores vazões do que os centrífugos com relação ao porte.

O princípio de funcionamento do compressor axial, é o da aceleração do ar com posterior transformação em pressão. É composto por uma seção estacionária, onde se encontram instalados os anéis com palhetas estatoras e a seção rotativa composta por um conjunto de rotores com palhetas montados em um eixo. Cada estágio de compressão é composto por um anel com palhetas estatoras e um rotor com palhetas. O rotor com palhetas é responsável pela aceleração do ar, como um ventilador. É nesta etapa que o ar recebe trabalho para aumentar a energia velocidade. O anel de palhetas estatoras tem a finalidade de direcionar o ar para incidir com um ângulo favorável sobre as palhetas do próximo rotor e promover a desaceleração do fluxo de ar para ocorrer a transformação da energia de velocidade em aumento de pressão e temperatura (efeito difusor).

- **Combustão** - Na câmara de combustão, 25% do ar comprimido e o combustível injetado a alta pressão promovem a mistura e queima a uma pressão praticamente constante.

As câmaras de combustão podem ser do tipo anular, tubular ou tuboanular. As câmaras do tipo tubular são normalmente utilizadas nas turbinas industriais de porte pesado e as câmaras do tipo anular são mais utilizadas nas turbinas industriais de porte leve. As turbinas aeroderivadas utilizam as câmaras do tipo tuboanular ou anular.

A ignição da mistura ar e combustível ocorre durante a partida, através de um ignitor e uma tocha quando aplicável. Posteriormente a combustão se auto sustenta.

Os gases gerados na combustão a alta temperatura **são expandidos** a uma alta velocidade através dos estágios da turbina geradora de gás que consiste de um conjunto rotor (eixo com rodas de palhetas) e as rodas estatoras com palhetas que promovem o efeito bocal e direcionam o fluido motriz (gases) para proporcionar um melhor ângulo de ataque nas palhetas das rodas da turbina, convertendo a energia dos gases em potência no eixo para acionar o compressor axial de ar e a turbina de potência.

- **Exaustão** - Em um avião a jato os gases remanescentes da expansão na turbina passam através de um bocal para aumentar sua velocidade e conseqüentemente o impulso (propulsão). Na aplicação industrial os gases são direcionados para uma turbina de reação ou turbina de potência com um ou mais estágios (estator e rotor), onde a energia disponível dos gases é convertida em potência no eixo para acionar os compressores de gás. Finalmente os gases fluem para o duto de exaustão, onde sua energia remanescente pode opcionalmente ser aproveitada em um sistema de recuperação de calor (aquecimento de água).

É importante lembrar que não existe conexão mecânica entre o eixo do conjunto gerador de gás (GG) e o eixo da turbina de potência (PT).

COMPARAÇÃO ENTRE O CICLO BRAYTON E O CICLO OTTO

Podemos fazer comparações entre os ciclos de funcionamento de uma turbina (ciclo Brayton) e de um motor convencional de quatro tempos (ciclo Otto). Em uma turbina a combustão ocorre a uma pressão constante, ao passo que em um motor convencional a combustão ocorre a um volume constante. Em ambos os ciclos ocorrem as etapas de admissão, compressão, combustão e exaustão (fig. 1.4). Em um motor de ciclo convencional (Otto), essas etapas ocorrem no mesmo local (cilindro) em tempos diferentes, sendo portanto um ciclo intermitente. Em uma turbina (ciclo Brayton), essas etapas ocorrem continuamente em locais diferentes.

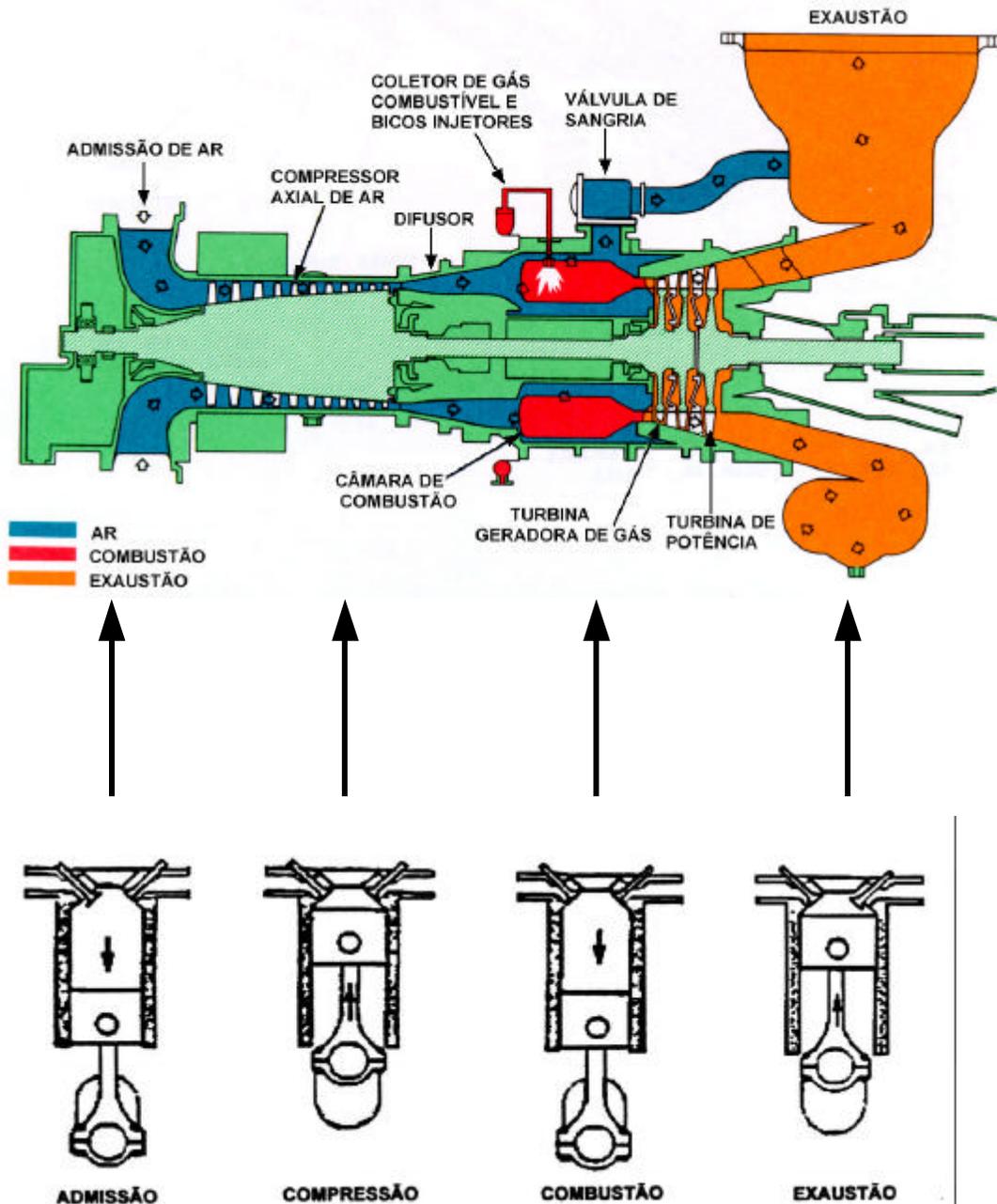
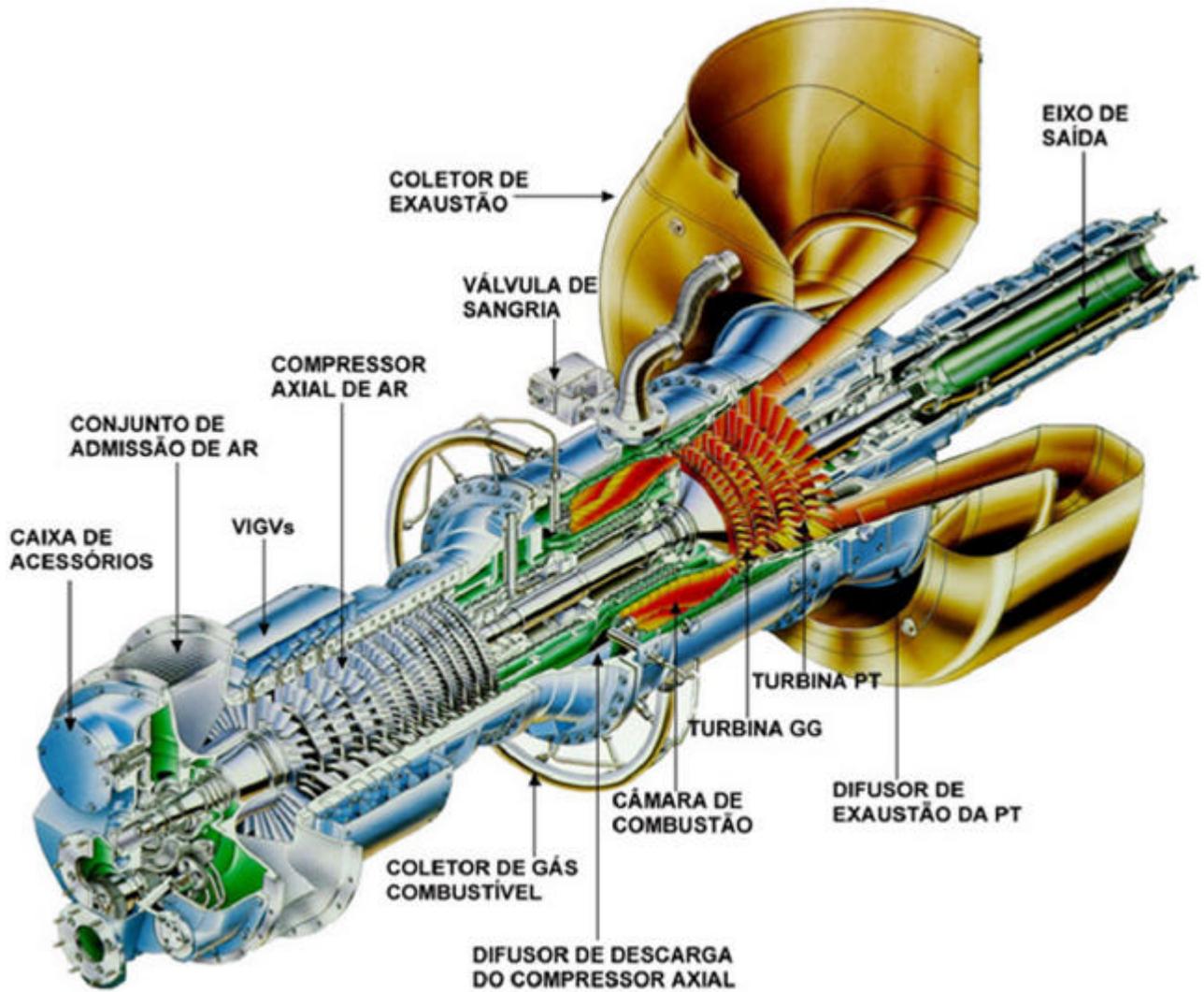


Fig. 1.4



TURBINA SOLAR TAURUS

Fig. 1.5

SISTEMAS AUXILIARES DA TURBINA

Os seguintes sistemas auxiliam na operação da turbina:

- 1- Sistema de proteção
- 2- Sistema de ar
- 3- Sistema de partida
- 4- Sistema de óleo lubrificante e óleo de comando hidráulico
- 5- Sistema de controle do fluxo de ar do compressor axial
- 6- Sistema de gás combustível
- 7- O casulo do turbocompressor

1- SISTEMA DE PROTEÇÃO

- ◆ **Sensores de vibração e temperatura dos mancais.** O eixo do conjunto gerador de gás (GG) e o eixo da turbina de potência (PT) são apoiados em mancais radiais e axiais (escora) do tipo pastilhas deslizantes (tilting pads bearings) ou de rolamentos (ball bearings), sendo este último mais aplicado nos geradores de gás aeroderivados. Nestes mancais são feitas monitorações de vibração radial através de sensores por deslocamento e aceleração (VEs). A monitoração de temperatura é feita nos mancais de escora e nos drenos de óleo dos mancais radiais utilizando sensores tipo termorresistência, RTDs (TEs).
- ◆ **Sensores de temperatura dos gases gerados.** Constitui de termopares normalmente instalados entre a exaustão da turbina GG e a admissão da turbina PT, onde recebem a denominação de termopares T4 ou T5. Em algumas turbinas do tipo industrial porte pesado (NUOVO PIGNONE) esses termopares são instalados na exaustão da turbina de potência, onde recebem a denominação de termopares T6. A monitoração dessa temperatura é feita individualmente para cada termopar, gerando uma temperatura média calculada. Essa monitoração é de extrema importância para a vida útil da turbina, sendo um item de limitação na operação.
- ◆ **Sensores de velocidade.** Utilizando sensores magnéticos (SEs) montados sobre engrenagens instaladas nos eixos GG e PT, as monitorações das velocidades GG (NGG) e PT (NPT) são itens de limitação na operação da turbina. No eixo da turbina PT, além dos sensores normalmente instalados, são utilizados também sensores de emergência de sobrevelocidade (backup overspeed), pois a turbina PT é uma turbina livre, portando aumentando as necessidades de monitoração de sobrevelocidade.

2- SISTEMA DE AR

O sistema de ar das turbinas normalmente se divide em 5 subsistemas:

- ◆ **Sistema de filtragem de ar de admissão para o gerador de gás.** Considerando que o ar succionado é utilizado no ciclo de funcionamento da turbina a gás com vários propósitos, a vida útil bem como o desempenho da turbina depende necessariamente da eficiência do sistema de filtragem. Esse sistema normalmente é composto de um casulo (alojamento) com 3 (três) a 5 (cinco) estágios de filtragem, juntas de expansão, duto de admissão com silenciadores e estabilizadores de fluxo. O primeiro estágio de filtragem é do tipo inercial com uma tela de aço inoxidável e venezianas verticais com a finalidade de reter partículas maiores (insetos) e água proveniente de chuvas. O segundo estágio é composto por elementos do tipo manta de fibra sintética coalescedora extratora de névoa de alta eficiência com densidade progressiva. O terceiro estágio é composto por elementos tipo caixa ou multibolsa para a filtragem final de partículas finas. Nesses sistemas são instalados indicadores, transmissores e sensores de pressão (PDIs, PDTs, PDSH, PDSHH) para monitoração e proteção através de sinal de alarme (normalmente em torno de 5" H₂O) ou sinal de parada (normalmente em torno de 7" H₂O).

- ◆ **Sistema de ar de combustão.** O ar admitido após filtrado é comprimido e passa por um difusor de descarga alcançando a câmara de combustão onde ocorrerá a mistura ar e gás combustível que será queimada. A quantidade de ar utilizada na combustão é de aproximadamente 25% que também é denominada de ar primário.
- ◆ **Sistema de ar de referência para controle.** Uma tomada de ar proveniente da descarga do compressor ar (PCD ou P2) é direcionada para ser utilizada como referência no sistema de controle de combustível e/ou sistema de controle do fluxo de ar do compressor axial (Atuadores das VIGVs, das válvulas de sangria).
- ◆ **Sistema de ar de resfriamento.** Considera-se que aproximadamente 75% do ar admitido e comprimido é utilizado como resfriamento (ar secundário) da parede interna da câmara de combustão onde grande parte dessa massa de ar recebe energia da combustão e se transforma em gases a alta temperatura (fluido motriz) que se expandem através das turbinas, transformando a energia térmica em energia mecânica. Através de tomadas de ar internas e externas, parcelas de ar são direcionadas para resfriar as palhetas estatoras dos primeiros estágios GG (vanes) e as faces dos discos das rodas das turbinas.
- ◆ **Sistema de ar de selagem dos mancais.** Através de tomadas de ar internas e externas proveniente da descarga do compressor de ar (PCD ou P2), parcelas de ar são direcionadas para pressurização dos selos de labirinto dos mancais para evitar a fuga de óleo lubrificante dos mancais para as seções internas de compressão, combustão e turbinas, evitando assim formação de pontos quentes causados pela queima desse óleo e consequentemente sérios danos às partes internas da turbina.

3- SISTEMA DE PARTIDA

Os sistemas de partida têm a finalidade de retirar o conjunto GG da inércia, proporcionando um fluxo de ar para purga GG, PT, duto de exaustão e recuperador de calor (WHRU) quando utilizado. Após o ciclo de purga é iniciada a ignição seguida da combustão, onde com a sustentação da rotação pelo motor de partida e com incremento de combustível, o torque no eixo do motor vai reduzindo e a velocidade aumentando. Assim segue até o ponto em que o ciclo de funcionamento gere energia suficiente para se auto-sustentar, nesse ponto o sistema de partida é desacoplado e o motor de partida é desligado.

Os sistemas de partida utilizados podem ser dos seguintes tipos:

- ◆ **Elétrico.** Utiliza um motor elétrico cujo suprimento é feito através de um variador de frequência (VFD) que controla a velocidade do motor através da variação de frequência. Pode ser utilizado também motor elétrico com duas velocidades, através de variação dos pólos na gaveta de comando do motor.
- ◆ **Eletrohidráulico.** Utiliza um motor elétrico para acionar um conversor de torque hidráulico ou uma bomba hidráulica que descarrega óleo a alta pressão acionando uma turbina hidráulica ou motor hidráulico.
- ◆ **Pneumático.** Utiliza uma turbina cujo fluido motriz é o gás natural ou ar comprimido.

Em todos os sistemas citados, o acoplamento entre o sistema de partida e o eixo do conjunto GG é feito através de um conjunto mecânico com catracas denominado embreagem livre, cujo acoplamento e desacoplamento é feito automaticamente através de força centrífuga.

4- SISTEMA DE ÓLEO LUBRIFICANTE E DE COMANDO HIDRÁULICO

Os sistemas de óleo lubrificante têm a finalidade de suprir óleo tipo mineral (turbinas industriais de porte leve e pesado) ou tipo sintético (geradores de gás aeroderivados), limpo, a uma determinada temperatura, pressão e vazão para resfriar e lubrificar os mancais da turbina, mancais e engrenagens da caixa de acessórios, mancais e engrenagens da caixa multiplicadora e mancais dos compressores centrífugos de gás, durante partida (pré-lubrificação), operação e parada (pós-lubrificação). Em algumas turbinas, têm também a finalidade de suprir óleo de comando hidráulico para o atuador das válvulas de sangria (Bleed Valves), atuador das palhetas variáveis guias de entrada (VIGVs) e atuador da válvula dosadora combustível.

Os sistemas são equipados com reservatório, bombas (principal mecânica, pré-lubrificação CA e pós-lubrificação CC, hidráulica), filtros dúples, resfriadores dúples, válvulas controladoras de pressão e temperatura, válvulas de bloqueio, segurança e retenção, indicadores, sensores e transmissores de pressão, temperatura e nível.

5- SISTEMA DE CONTROLE DO FLUXO DE AR DO COMPRESSOR AXIAL

Esse sistema de controle tem a finalidade de ajustar a vazão de ar do compressor axial da turbina de acordo com sua condição operacional, com os seguintes propósitos:

- ◆ Evitar danos causados por efeitos aerodinâmicos (STALL e SURGE) em baixas rotações.
- ◆ Controlar o fluxo de ar na admissão do compressor axial, mantendo ajustada a sua curva de desempenho com a curva do sistema (oferta de ar).

O compressor é projetado para operar com alta eficiência em altas rotações, que é a situação normal de operação. Nas condições de baixas rotações a faixa operacional estável é muito estreita, podendo sair dessa faixa e entrar na zona de instabilidade operacional onde ocorre efeitos aerodinâmicos danosos ao compressor, que é o descolamento da camada limite que envolve as palhetas e ondas de choque. O primeiro, conhecido como o "STALL", provoca o bloqueio do fluxo ar e se inicia nos primeiros estágios. O segundo, conhecido como "SURGE", são sucessivas inversões e reversões do fluxo quando o compressor atinge a condição de vazão mínima que corresponde a máxima energia (HEAD) para uma determinada rotação, provocando os choques das massas de ar e conseqüentemente vibrações a níveis de danificar o compressor.

O surge nos compressores axiais é evitado através da utilização de uma ou mais válvulas de sangria (bleed valve) que proporcionam a sangria de ar de alguns estágios ou da descarga do compressor axial para o duto de exaustão da turbina.

Esse sistema utiliza os seguintes componentes:

- ◆ Atuador hidráulico das VIGVs.
- ◆ Anéis atuadores das VIGVs.
- ◆ Estatores com palhetas guias variáveis de entrada (VIGVs).
- ◆ Atuador hidráulico ou pneumático das válvulas de sangria.
- ◆ Válvulas de sangria (Bleed Valve).

6- SISTEMA DE GÁS COMBUSTÍVEL

O sistema de gás combustível da turbina tem a finalidade de suprir gás seco, limpo a determinada pressão, proveniente de uma planta de processo, para partida e operação normal, temperatura de aproximadamente 20 °C acima do ponto de orvalho e uma determinada vazão para a câmara de combustão através do coletor de distribuição de combustível com os bicos injetores. O sistema dosa automaticamente o combustível durante a partida, aceleração, operação e desaceleração.

O sistema de controle recebe os sinais de NGG, NPT, T5, T1, referência da junção fria, sinal de retorno da dosadora de gás (feedback) e ponto de ajuste NGG ou NPT e os fornece para o controlador de combustível. O controlador de combustível processa esses sinais e gera um sinal de saída para o atuador de combustível que posicionará a dosadora de gás fornecendo para a câmara de combustão a vazão de combustível requerida.

O sistema é composto por válvulas de bloqueio automáticas denominadas primária e secundária, válvulas solenóides de comando e alívio, válvulas controladoras de pressão e vazão, sensores e transmissores de pressão e temperatura, ignitores e coletor de gás com os bicos injetores.

7- CASULO DO TURBOCOMPRESSOR

O casulo é uma estrutura de projeto modular, composta por painéis de aço removíveis com capacidade de isolamento térmico e acústico. Possui portas de acesso e pontes rolantes para retirada da turbina e compressores para manutenções. É pressurizado para manter o turbocompressor isolado da atmosfera externa.

Possui um sistema de ventilação/pressurização equipado com ventiladores, abafadores (dampers) e sensores de pressão diferencial (PDSL, PDSLL). Possui também um sistema de segurança interno que inclui sensores de gás, UV, de temperatura, gás e sistema de extinção de incêndio (CO₂).

Nas laterais são instalados painéis com instrumentos para monitoração e proteção.

Nota:

Em alguns projetos os compressores de gás não são protegidos por casulos.

CAIXA MULTIPLICADORA

A caixa multiplicadora proporciona a adequação da rotação da máquina motriz, turbina PT com os compressores centrífugos de gás pois esses possuem rotações nominais maiores.

Normalmente possuem dois eixos com engrenagens paralelas denominadas de engrenagem motriz tipo coroa ou de baixa velocidade e engrenagem operatriz tipo pinhão ou de alta velocidade. Os eixos são apoiados em mancais radiais e axiais tipo pastilhas deslizantes onde se encontram instalados para a proteção, os sensores de temperatura tipo RTDs (TEs), sensores de vibração radial por deslocamento e aceleração (VEs) e sensores de deslocamento axial (ZEs).

COMPRESSORES CENTRÍFUGOS

1- INTRODUÇÃO

Os compressores centrífugos são máquinas operatrizes utilizadas para proporcionar elevação da pressão de um gás e seu escoamento. Podem ser requeridos para as mais variadas condições de operação, de modo que toda a sua sistemática de especificação, projeto, operação, manutenção, depende fundamentalmente da aplicação.

São indicados para a movimentação de grandes volumes, a baixa ou média razão de compressão (relação entre a pressão de descarga e a pressão de sucção). Operam em alta rotação e são geralmente acionados por turbinas a gás.

2- PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Os compressores centrífugos (Fig. 1.6) também chamados de radiais, pertencem a família dos compressores dinâmicos. Possuem um impelidor ou uma série de impelidores montados em um eixo (conjunto rotor) e dotados de palhetas que se dispõem na direção do raio do impelidor, geralmente encurvadas no sentido inverso ao da rotação do eixo.

Sob o efeito da rotação, forma-se uma corrente de gás que é aspirada pela parte central do impelidor e projetada para a periferia na direção do raio pela ação da força centrífuga, alcançando os canais difusores, curvas de retorno e canais de retorno, montados em componentes estacionários denominados diafragmas, nesses canais a velocidade do gás é reduzida consequentemente ocorrendo o aumento da pressão.

Os componentes estacionários e rotativos dos compressores são envolvidos por uma carcaça com os bocais de sucção e descarga. De acordo com a configuração da carcaça os compressores centrífugos recebem as denominações de tipo vertical ou barril (Vertical Split) e tipo horizontal (Horizontal Split), sendo o tipo vertical especificado para condições que exigem altas pressões de operação e o tipo horizontal especificado para condições que exigem baixas pressões de operação.

Um compressor, como qualquer equipamento de fluxo, tem seu comportamento influenciado pelas características do processo no qual ele está inserido. No caso dos compressores, toda essa influência pode ser precisamente representada por quatro parâmetros denominados características do serviço (ou sistema), que são:

- ♦ Pressão de sucção (P1)
- ♦ Temperatura de sucção (T1)
- ♦ Natureza molecular do gás (composição)
- ♦ Pressão de descarga (P2)

Assim, é possível considerar que os valores instantaneamente assumidos por esses parâmetros definem todas as grandezas associadas ao desempenho do compressor, dentre as quais podemos citar:

- ♦ Vazão de operação (volumétrica ou mássica)
- ♦ Potência de compressão
- ♦ Temperatura de descarga (T2)
- ♦ Eficiência
- ♦ Intensidade dos esforços

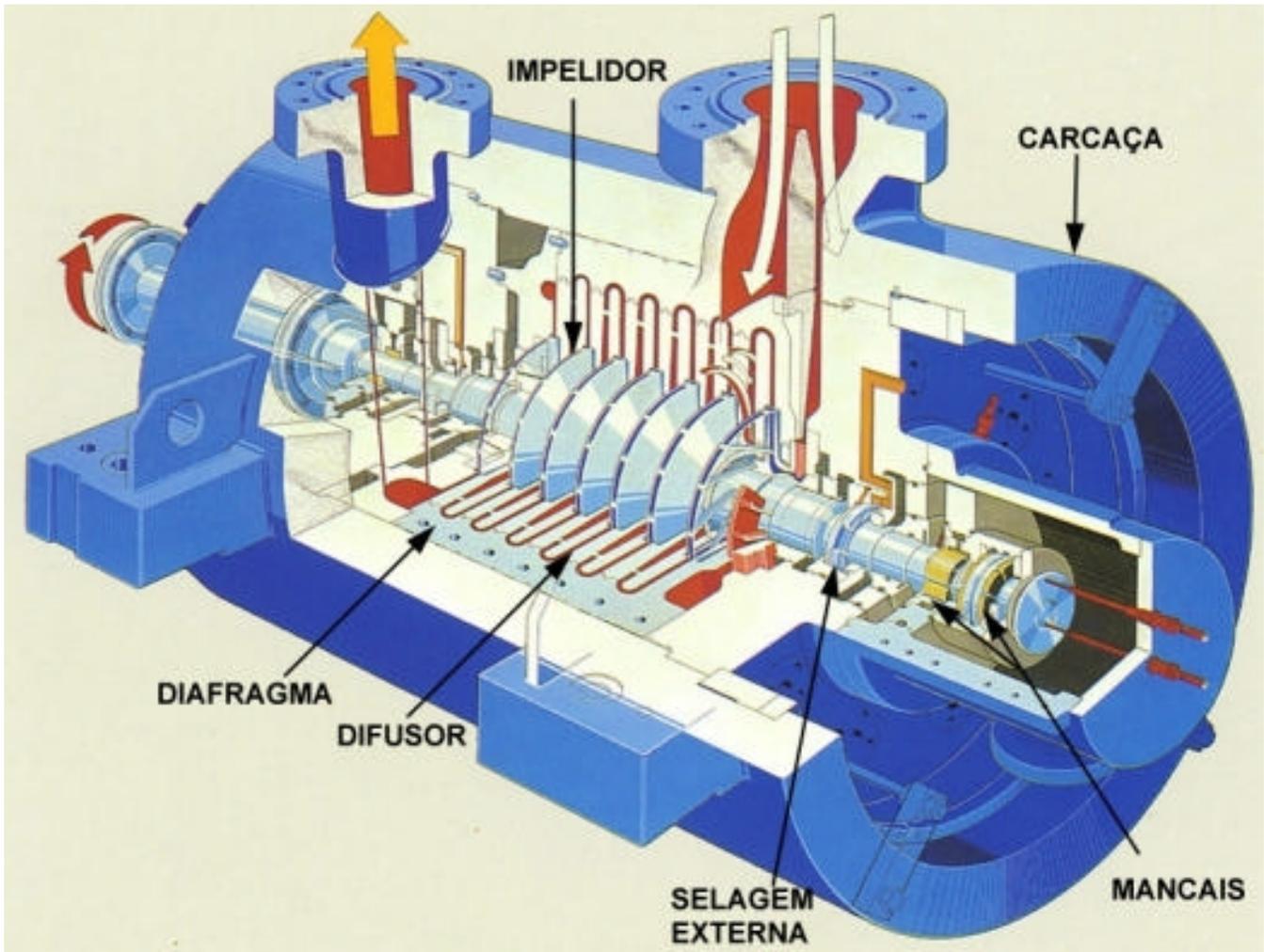


Fig. 1.6

SISTEMAS AUXILIARES DO COMPRESSOR CENTRÍFUGO

Os seguintes sistemas auxiliam na operação de um compressor centrífugo:

- 1- Sistema de proteção
- 2- Sistema de balanceamento axial
- 3- Sistema de selagem
- 4- Sistema de óleo ou gás de selagem
- 5- Plantas de processo de compressão e gás combustível

1- SISTEMA DE PROTEÇÃO

O conjunto rotor é apoiado radialmente e axialmente por mancais do tipo pastilhas deslizantes. Nesses mancais são instalados sensores de temperatura tipo RTDs (TEs), vibração radial (VEs) e deslocamento axial (ZEs).

2- SISTEMA DE BALANCEAMENTO AXIAL

Nos compressores centrífugos o gás descarregado pelos impelidores ocupa o espaço existente entre os próprios impelidores e os diafragmas gerando um campo de pressões. A distribuição das pressões resulta em uma força axial no sentido da descarga para a sucção do compressor. O somatório das forças atuantes sobre cada impelidor corresponde ao que é denominado empuxo axial.

O posicionamento axial do conjunto rotativo é mantido pelo mancal de escora e o bom funcionamento deste dispositivo exige que o empuxo axial seja moderado, sem o que teríamos rápido desgaste das pastilhas e elevada dissipação de energia em perdas mecânicas. Para contornar isso, os projetistas devem optar por um dos seguintes recursos:

- Uso de pistão ou tambor de balanceamento e linha de balanceamento
- Uso de fluxo em duplo sentido

O pistão de balanceamento é uma peça cilíndrica fixada ao conjunto rotativo logo após o último impelidor com a finalidade de gerar uma força contrária ao empuxo axial. A face interna do pistão de balanceamento fica naturalmente exposta à pressão de descarga, enquanto a outra face fica submetida a pressão de sucção através de uma câmara ligada à sucção do compressor por uma tubulação externa denominada de linha de balanceamento. Tendo uma das faces expostas à pressão de descarga e outra a pressão de sucção, é gerada uma força contrária e de aproximadamente mesma intensidade ao empuxo axial, promovendo o deslocamento do eixo no sentido da sucção para a descarga, balanceando o conjunto rotor axialmente. Através da determinação da área transversal do pistão de balanceamento é que o projetista pode compensar o empuxo axial na medida desejada.

O outro recurso consiste em estabelecer dois conjuntos de impelidores no mesmo eixo, de modo que eles sejam percorridos em sentidos opostos pelo gás (Back to Back). Neste caso a anulação do empuxo axial não é absoluta, tornando-se necessário a instalação do pistão de balanceamento de menor porte, em relação ao emprego anteriormente citado.

3- SISTEMA DE SELAGEM

O sistema de selagem tem a finalidade de minimizar as fugas de gás interna e externamente ao compressor, entre as partes moveis (rotor) e estáticas (diafragma e carcaça).

Este sistema se divide em:

- ♦ Selagem interna
- ♦ Selagem externa

As fugas internas proporcionam a queda da eficiência de compressão devido a recirculação nos impelidores e as fugas externas pode acarretar desequilíbrio no pistão de balanceamento, acesso de gás aos mancais e fuga para atmosfera local.

A selagem interna de um compressor centrífugo compreende dois pontos por impelidor. As fugas ocorrem onde o gás, procurando sempre as regiões de menor pressão tenta passar pelas pequenas folgas entre o conjunto rotativo e as partes estacionárias. Os dispositivos utilizados com essa finalidade são os anéis de labirintos, constituídos por uma superfície filetada que minimiza o vazamento do gás pela sucessão de mudanças de direção que lhe são impostas. Os anéis de labirintos são encaixados nas extremidades dos diafragmas e servem também para efetuar a vedação do pistão de balanceamento. São fabricados em metal macio, usualmente alumínio, deformam-se ao menor contato com o eixo, de modo a não introduzir carregamento transversal sobre o mesmo.

A selagem externa tem como finalidade impedir o vazamento do gás através da passagem entre a periferia do eixo e as partes estacionárias nas extremidades dos compressores, evitando assim a fuga do gás para o meio externo (atmosfera). O dispositivo de selagem do lado do bocal de sucção atua sujeito à pressão e temperatura de sucção do sistema enquanto do lado da descarga verifica-se uma pressão ligeiramente superior à de sucção (devido à linha de balanceamento) e uma temperatura próxima da temperatura de descarga do compressor. Esses parâmetros, além da natureza do gás comprimido, definem as características da selagem a ser utilizada. Há quatro tipos de selagem externa para compressores centrífugos:

- ♦ Selo de labirintos
- ♦ Selo de anéis de carvão
- ♦ Selo de anéis flutuantes ou de filme de óleo
- ♦ Selo mecânico

Atualmente alguns compressores da UN-BC utilizam selos externos do tipo seco com gás. O gás utilizado nesses selos, além de promover a selagem tem também a finalidade de promover o resfriamento das superfícies de contato do selo, portando é necessário que o gás seja condicionado em uma pequena unidade de tratamento para ficar isento de impurezas, condensado e umidade.

4- SISTEMA DE OLÉO DE SELAGEM

Os sistemas de óleo de selagem utilizam óleo mineral normalmente TR-32 e têm a finalidade de suprir óleo limpo e isento de gás a uma determinada temperatura e com pressão superior ao gás de referência, afim de efetuar a selagem das fugas de gás através dos selos de anéis flutuantes ou anéis de carvão (carbono sintético) localizados nas extremidades dos eixos dos compressores, durante a seqüência de partida, operação normal e parada. Desta maneira é evitado o vazamento de gás dos selos externos para os mancais e para atmosfera o que acarretaria sérios riscos operacionais.

Os sistemas são equipados com reservatório, bombas CA, filtros dúplex, resfriadores dúplex, válvulas controladoras de pressão diferencial, controladora de temperatura, válvulas de bloqueio, segurança e retenção, tanques elevados (overheads ou rundown), tanque desgaseificador com resistência de aquecimento, indicadores, sensores de pressão diferencial, de temperatura e nível.

5- PLANTAS DE PROCESSO DE COMPRESSÃO E GÁS COMBUSTÍVEL

O gás após comprimido, escoar para a planta de processo de compressão (Fig. 1.7) que tem a finalidade de promover o seu resfriamento, reduzindo a potência requerida no estágio de compressão seguinte e evitando danos aos componentes mecânicos dos compressores (selos de labirintos). Como consequência do resfriamento o gás terá suas frações pesadas (condensado) retidas e drenadas. A planta permitirá também o alinhamento do gás na sucção, descarga e alívio de forma segura.

Para tais tarefas, em uma planta de processo são instalados resfriadores (normalmente do tipo casco/tubo), vasos depuradores de gás (scrubbers), válvulas automáticas de fechamento (SDVs), alívio (BDVs) e controle (FVs, TVs e LVs), válvulas manuais de bloqueio, válvulas de retenção e PSVs, Indicadores (Pis, Tis), sensores (PSHHs, LSHHs, TSHHs), transmissores (LTs, PTs, TEs, FTs).

As plantas de processo de gás combustível podem ser internas ou externas ao pacote do turbocompressor. As plantas internas processam o gás proveniente do interestágio de compressão (sucção do 2º estágio de compressão). As plantas externas podem processar o gás do interestágio de compressão ou do gasoduto de exportação/importação de alta pressão. Essas plantas têm a finalidade de condicionar (reduzir a pressão com consequente resfriamento, depurar, filtrar e aquecer) o gás para ser utilizado como combustível da turbina. São compostas por vasos depuradores de gás, filtros, aquecedor (normalmente elétrico), válvulas manuais de bloqueio, PSVs, LVs, PVs, BDVs e Indicadores (Pis, Tis), sensores (PSHHs, LSHHs, TSHHs), transmissores (LTs, PTs, TEs, FTs).

A segurança nas plantas de processo é feita através de rede de fusíveis plug, rede de dilúvio, sensores de UV e gás instalados estrategicamente.

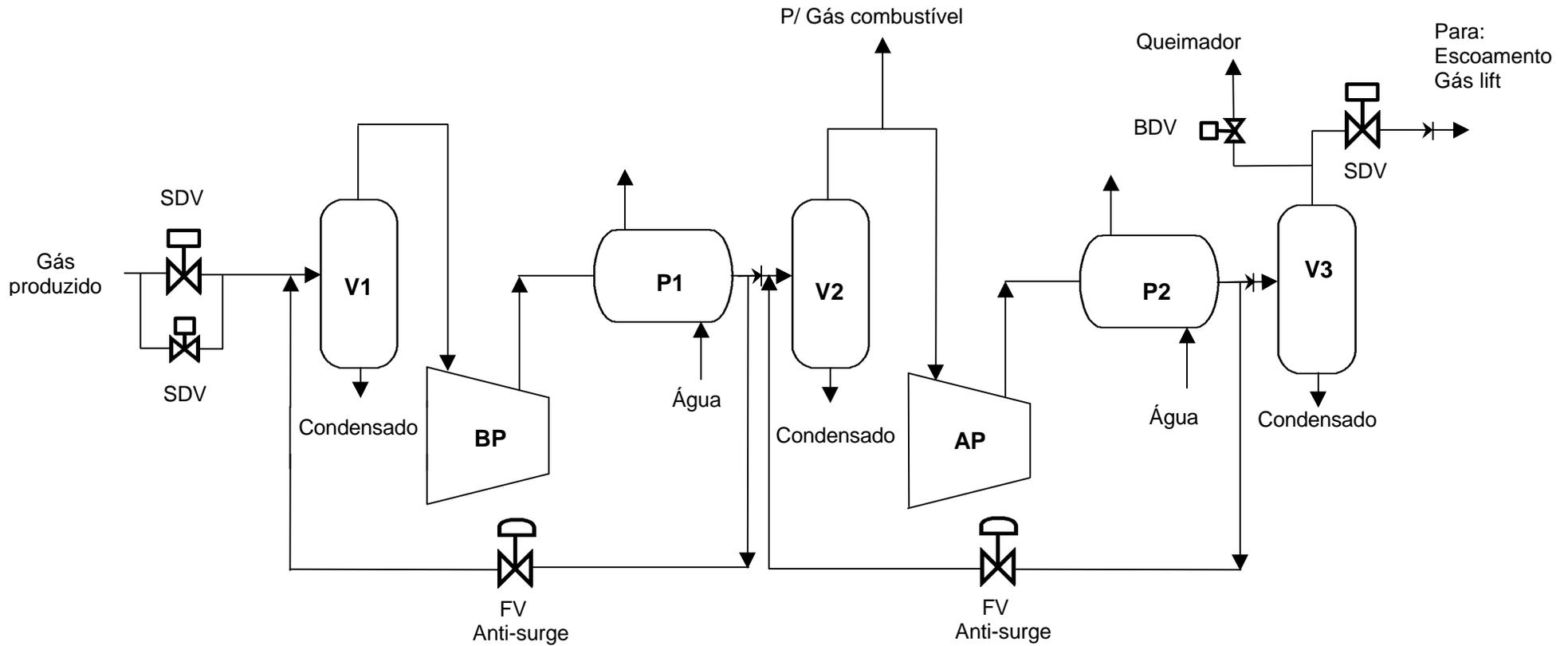


Fig. 1.7

CONTROLE DOS TURBOCOMPRESSORES

O controle dos turbocompressores normalmente se encontra alojado em cabines. Divide-se no painel de controle principal e os painéis auxiliares do turbocompressor. As cabines são pressurizadas, refrigeradas e protegidas com sistemas de detecção de gás, hidrogênio, fumaça, elevação brusca de temperatura (sensores termovelocimétrico) e sistema de extinção de incêndio com CO₂.

Nas cabines normalmente encontram-se instalados os seguintes painéis:

- 1- Painel de controle do turbocompressor (Painel principal).
- 2- Painel Retificador e carregador de baterias 24 VCC.
- 3- Painel Centro de controle de motores - CCM.
- 4- Painel de pressurização.
- 5- Painel do sistema de ar condicionado.
- 6- Painel de fogo, fumaça, gás, hidrogênio e extinção de incêndio.
- 7- Painel do variador de frequência do motor de partida - VFD.
- 8- Painel do aquecedor de gás combustível.
- 9- Sistema de controle anti-surge e capacidade

1- PAINEL DE CONTROLE DO TURBOCOMPRESSOR

Os sistemas de controle dos turbocompressores permitem as funções de seqüenciamento, controle, proteção e monitoração do conjunto.

A função de seqüenciamento monitora e controla os elementos lógicos no sistema, que são os eventos denominados discretos como: liga/desliga, abre/fecha, parte/para, sim/não que estão associados a chaves (PSH, LSH, TSHH e etc.), motores, solenóides, relés e dispositivos comparadores.

A função de controle monitora e controla a operação dos elementos analógicos no sistema, que estão associados a variáveis de velocidade, temperatura, pressão, vibração, corrente elétrica relacionados a transmissores, transdutores e atuadores.

A função de proteção monitora os limites operacionais, comparando-os com limites pré estabelecidos e protege o turbocompressor contra o mau funcionamento do sistema e dos componentes.

A função de monitoração traduz as informações de operação para o operador através de um computador de interface equipado com um monitor de vídeo.

Os painéis de controle dos turbocompressores são normalmente compostos por consoles com portas onde se encontram os seguintes equipamentos:

♦ **Controlador lógico programável (PLC).** O PLC tem a finalidade de executar as funções de seqüenciamento de partida, parada e controle de operação do turbocompressor através da utilização de um microprocessador que armazena e processa dados de entrada usando programas de controle (LADDERS), comandando sinais de saída para diversos dispositivos, monitorando as condições de operação e dados requisitados pelo operador. O controlador programável envia comando para os dispositivos de controle de combustível da turbina, controle de capacidade dos compressores de gás, controle anti-surge dos compressores de gás, temperatura, pressão, nível e etc. Está localizado no interior do console do painel de controle, montado em gabinetes (CHASSIS I/O). O PLC é composto pelos seguintes módulos.

- ♦ Módulo processador.
- ♦ Módulo de comunicação ETHERNET.
- ♦ Módulos de conversão de sinais de entrada e saída (Módulo I/O).
- ♦ Módulos de entrada dos sinais dos sensores de temperatura tipo RTD.
- ♦ Módulo de entrada dos sinais de tensão em milivolts provenientes dos termopares.
- ♦ Módulo de entrada dos sinais dos sensores de velocidade da turbina GG e PT.
- ♦ Módulo adaptador remoto de sinais de entrada e saída (Remote I/O adapter).

♦ **Painel de controle da turbina.** É o dispositivo principal de controle para o operador. Tem a finalidade de possibilitar ao operador, meios de comandos e monitoração para partida da turbina, parada, aceleração, desaceleração, colocação em carga, retirada de carga, reconhecimento de sinais de alarme e parada, rearme dos sinais de alarme e parada, seleção de modo operacional e etc. Permite também a operação manual de fechamento e abertura das válvulas anti-surge dos compressores de gás. Esses comandos são feitos a partir de botoeiras, indicações luminosas e uma chave seletora.

♦ **Computador de interface com o operador.** É um conjunto integrado multiprocessador, multitarefa com um computador industrial (PC 486/DX2-66 MHz, 8 Mb RAM, HD 170 Mb, placa de vídeo SVGA de 1Mb, sistema operacional DOS), um cartão eletrônico denominado ARTIC (Asynchronous Realtime Interface Coprocessor - Coprocessador Assíncrono de Interface em Tempo Real), monitor de vídeo 14" (16 cores, 640 x 480 pixels de resolução), dispositivo para disquete de 3 ½", teclados numérico/controle e de funções.

O computador tem a finalidade de fazer a interface das informações de controle e operação do PLC com o operador. Serve como um dispositivo de entrada para comandos de controle secundário. Permite que o operador visualize através de telas no monitor, os sinais de alarme, parada, dados de operação, dados históricos e mapas de desempenho em tempo real. Serve também para processar comandos de entrada do operador para alterar pontos de ajustes do sistema de controle e para operação de dispositivos. A comunicação entre o computador e o PLC é feita através do cartão eletrônico ARTIC

♦ **Sistema de detecção, supervisão e extinção de incêndio.** Esse sistema consiste de detetores de raios ultra violeta (UV), sensores termovelocimétricos, um controlador e um painel de supervisão. O sistema supervisiona toda a parte de segurança referente ao sensores de UV e térmicos instalados no interior do casulo bem como o sistema de CO₂.

♦ **Sistema de monitoração de vibração.** Tem a finalidade de receber os sinais dos transmissores instalados no turbocompressor e fornecer os seguintes dados ao PLC para permitir uma monitoração remota.

- ♦ Condições de funcionamento, diagnóstico, alarmes e sinais de parada para cada canal de vibração.
- ♦ Níveis gerais de vibração (posição axial, vibração radial em deslocamento, velocidade e aceleração).
- ♦ Tensão de afastamento (GAP VOLTAGE) para cada canal de vibração.

♦ **Sistema reserva de emergência (BACKUP).** O Sistema reserva de emergência é feito através de uma lógica de relés, efetuando a função de proteção do turbocompressor no caso de mau funcionamento do sistema de controle principal (falha do PLC), detecção de fogo no casulo, atuação do sensor reserva de emergência de sobrevelocidade da turbina de potência (backup overspeed) ou acionamento das botoeiras de emergência localizadas no painel, no casulo do turbocompressor ou remota quando houver.

♦ **Fontes de alimentação de energia.** Recebe a tensão de 20 a 32 VCC proveniente do retificador e suprir os gabinetes do PLC com uma tensão regulada e estabilizada de 5 VCC que é distribuída para os diversos nódulos do PLC.

2- RETIFICADOR E CARREGADOR DE BATERIAS 24 VCC

O retificador e carregador de baterias têm a finalidade de retificar a tensão de 220 VCA em 24 VCC para alimentar o painel do TC e equipamentos alimentados com essa tensão. Tem a finalidade também de manter as baterias em regime de flutuação ou carga quando necessário. As baterias suprem energia para os equipamentos quando na falta de energia CA.

3- CENTRO DE CONTROLE DE MOTORES (CCM)

O centro de controle de motores tem a finalidade de distribuir a energia em 480, 240 e 120 VCA para os diversos equipamentos elétricos (motores, aquecedores) dos sistemas auxiliares do turbocompressor. Possui gavetas com disjuntores, contatores, relés térmicos, chaves seletoras de três posições (manual/desligado/automático), transformador, amperímetros e lâmpadas de indicação.

4- PAINEL DE PRESSURIZAÇÃO

Por motivos de segurança a cabine de controle é pressurizada. Esse painel é responsável pela pressurização através de ventiladores localizados sobre a cabine. Possui abafadores (dampers), indicador e sensor de pressão diferencial.

5- PAINEL DO SISTEMA DE AR CONDICIONADO

Devido aos equipamentos eletrônicos alojados na cabine, é necessário um sistema de refrigeração. Normalmente esse sistema se localiza sobre o casulo junto com os ventiladores do sistema de pressurização.

6- PAINEL DE FOGO, FUMAÇA, GÁS, HIDROGÊNIO E EXTINÇÃO DE INCÊNDIO

Responsável pela supervisão dos sensores de gás, hidrogênio, fumaça e térmico localizados no interior da cabine de controle e compartimento do retificador carregador de baterias. Responsável também pelo sistema de CO₂.

7- PAINEL VARIADOR DE FREQUÊNCIA DO MOTOR DE PARTIDA (VFD)

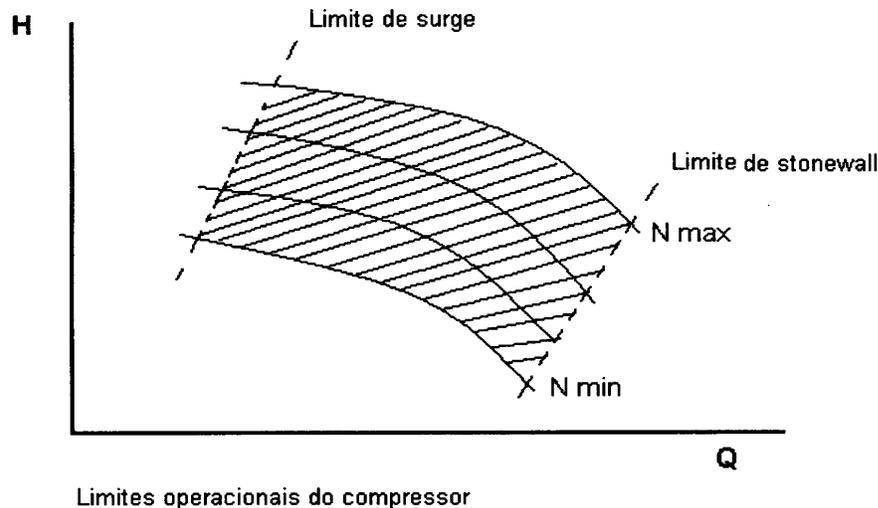
Recebe alimentação elétrica proveniente do CCM e alimenta o motor de partida da turbina com uma tensão variável devido a variação de frequência, permitindo que o motor de opere com rotação variável.

8- PAINEL DO AQUECEDOR DE GÁS COMBUSTÍVEL

Responsável pelo controle de operação do aquecedor de gás combustível localizado na planta de processo de gás combustível.

9- SISTEMA DE CONTROLE ANTI-SURGE E CAPACIDADE

Os compressores centrífugos apresentam restrições impostas aos seus funcionamentos quando submetidos a determinadas circunstâncias, assim fica delimitada a área útil de operação sobre o conjunto de curvas características. A envoltória dessa área é formada pelos limites superior e inferior, respectivamente correspondentes à máxima e mínima rotações permissíveis em operação contínua, e mais os limites à esquerda e à direita, definidos pela ocorrência de fenômenos aerodinâmicos conhecidos respectivamente como "surge" e "stonewall".



Vejamos o significado de cada um desses limites.

LIMITES DE ROTAÇÃO

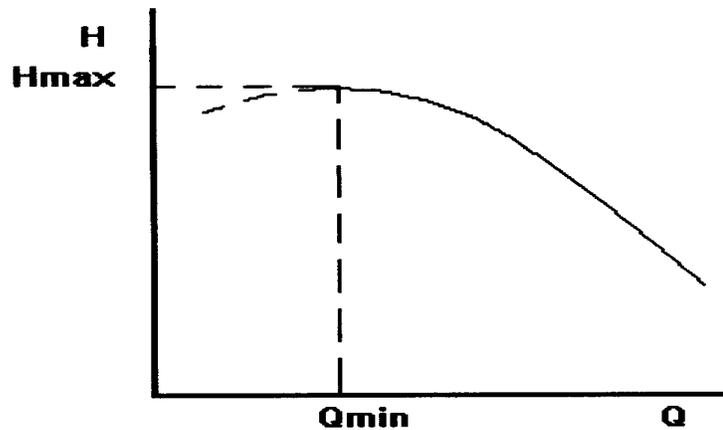
A máxima rotação em regime contínuo de operação é definida em função dos níveis de esforços a que é submetido o conjunto rotativo, enquanto a rotação mínima deve se situar acima da primeira velocidade crítica de vibração. O standard 617 da API regulamenta a construção de compressores a 105% da maior rotação e 85% da menor rotação requeridas pelas condições específicas para máquina.

LIMITE DE SURGE

O surge é um fenômeno caracterizado pela instabilidade do ponto de operação e ocorre quando a vazão que o sistema se mostra capaz de absorver é inferior a um certo valor mínimo. manifesta-se através de oscilações de vazão e pressões do sistema em geral acompanhados de forte ruído e intensa vibração do compressor, podendo levar rapidamente a uma falha mecânica.

Uma explicação simplificada para o surge pode ser obtida associando-o ao ponto máximo da curva HEAD x VAZÃO, que teria um ramo virtual ascendente, representado em linha tracejada na figura. Dizemos virtual porque esse trecho é constituído por condições instáveis de funcionamento.

O HEAD é a energia por unidade de massa absorvida pelo gás no processo de compressão.



Podemos dizer que o surge é um fenômeno aerodinâmico que ocorre nos compressores dinâmicos (centrífugos ou axiais) quando submetido a operar com uma vazão mínima, que corresponde a um head máximo. Esse fenômeno se caracteriza pela sucessivas inversões e reversões de fluxo e como consequência ocorre os choques entre as massas de gás promovendo vibrações, empeno do eixo, destruição dos sistemas de selagem e dos impelidores. Deve ficar claro que para cada rotação existe uma vazão mínima e que é tanto menor quanto menor for a rotação.

LIMITE DE STONEWALL

Compressores centrífugos industriais são projetados para funcionar com regime de escoamento subsônico. Se a vazão de operação é elevada, no entanto, é possível que a velocidade de escoamento do gás atinja o valor sônico em algum ponto no interior do compressor, usualmente na entrada das pás do impelidor, caracterizando o que se denomina limite de stonewall. O resultado prático desse fato é a impossibilidade de aumentar a vazão a partir desse ponto, além de uma acentuada queda na eficiência do processo de compressão.

O limite de stonewall não representa nenhuma ameaça à integridade do compressor, mas pode se constituir num grave inconveniente caso venha a ocorrer dentro do range de vazão necessária à operação do sistema.

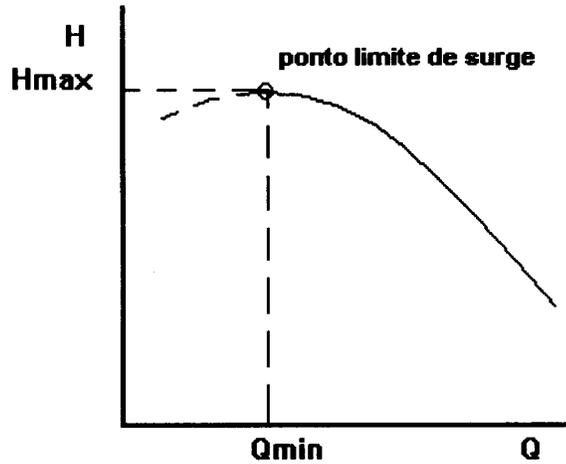
SISTEMA DE CONTROLE ANTI-SURGE

O método de controle anti-surge empregado é o da recirculação do gás da descarga para a sucção do compressor centrífugo, através da instalação de uma linha com válvula de controle automático. O controlador anti-surge deve ser programado para que ao se aproximar do ponto de surge, seja comandada a abertura da válvula de modo que a vazão no compressor fique acima da vazão mínima.

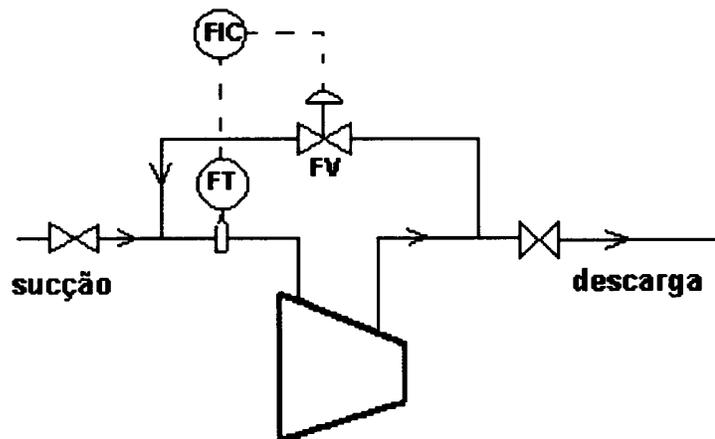
Veremos a seguir as malhas de controle anti-surge que podem ser empregadas de acordo com a instalação do compressor centrífugo.

COMPRESSOR CENTRÍFUGO ACIONADO POR MOTOR ELÉTRICO SEM VARIAÇÃO DE VELOCIDADE.

Neste caso o acionador (motor elétrico) opera com rotação constante e o compressor possui a seguinte curva:



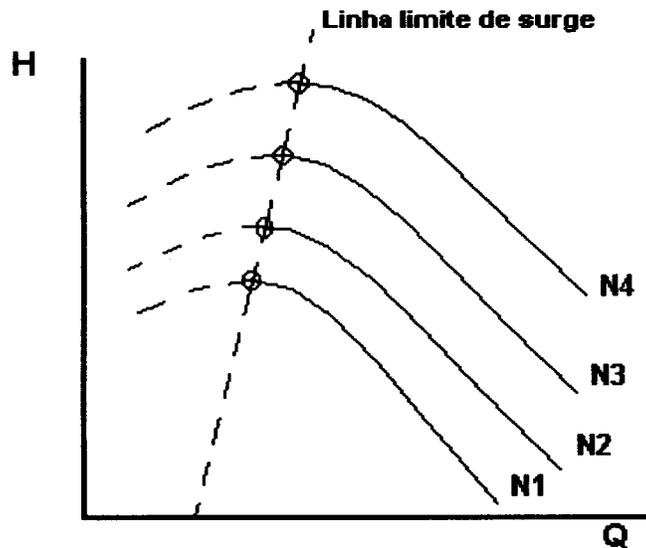
Sabendo-se que a vazão de operação deve ser maior do que a vazão mínima, é estimado um desvio de aproximadamente 10% a direita desta para ser o ponto de ajuste na qual a FV deverá iniciar a abertura. A malha então deve constar de um elemento primário de fluxo (placa de orifício) na sucção do compressor, um transmissor de fluxo (FT), um controlador indicador de fluxo (FIC) e uma válvula de recirculação (FV) conforme o esquema abaixo.



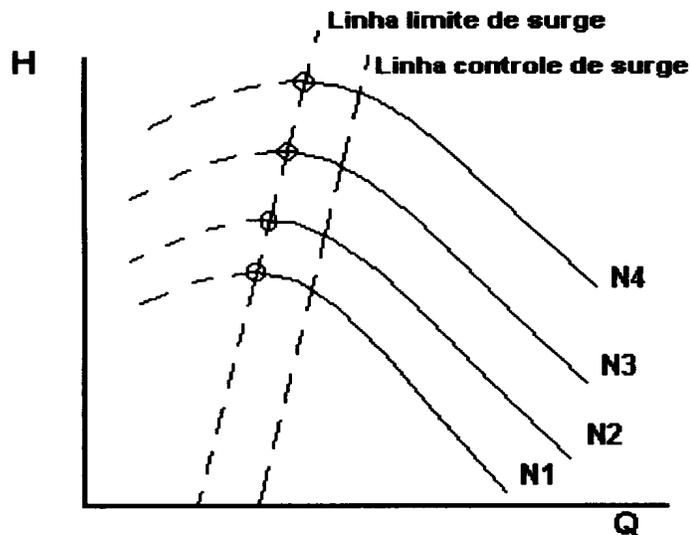
O elemento primário de fluxo (FE) envia o sinal de pressão diferencial para o transmissor de fluxo (FT), este o converte para um sinal de saída elétrico (miliamper) que é enviado para o controlador indicador de fluxo (FIC). Esse controlador tem o ponto de ajuste correspondente a uma vazão 10% acima da vazão mínima de operação, que correspondente ao ponto de surge. Durante a operação se em algum momento ocorrer uma queda da vazão e atingir a vazão de ajuste o controlador comanda o início da abertura da FV de modo que a vazão fique igual ao valor de ajuste.

COMPRESSOR CENTRÍFUGO ACIONADO POR TURBINA A GÁS OU MOTOR ELÉTRICO COM VARIAÇÃO DE VELOCIDADE

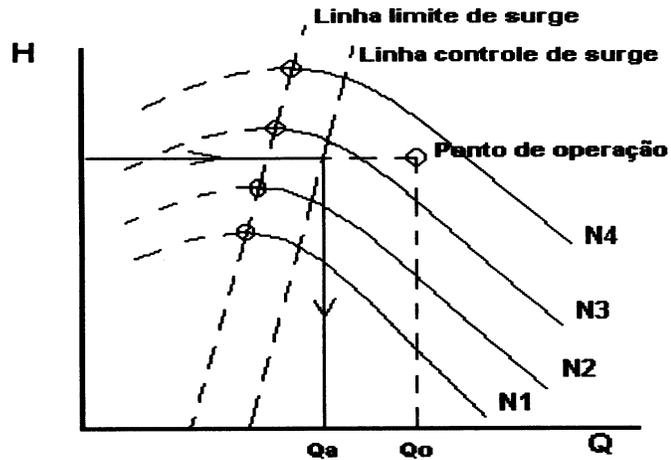
Nesse caso o acionador permite a operação com uma gama de rotações e o compressor apresenta as seguintes curvas:



Nesse caso para cada rotação existe um ponto limite de surge, então um FIC não atende mais o controle, pois o ponto de ajuste não pode ser único. Como pode ser visto, com a interseção dos pontos limites de surge é obtido a linha limite de surge. O controle agora deve ser através de uma linha paralela e a direita da linha limite de surge, denominada linha de controle de surge.



É desta linha de controle que deve ser extraído o ponto de ajuste da vazão de controle "Qa", que para cada rotação corresponde a uma vazão, ou seja, o ponto de ajuste deve ser determinado a cada condição operacional do compressor, equivalente ao head. Obtendo-se o head, é determinado o ponto de interseção com a linha de controle de surge e traçando-se uma linha paralela ao eixo do head passando pelo ponto de interseção é obtida a vazão de ajuste "Qa" para aquela condição operacional, conforme pode ser visto no gráfico abaixo. É com essa vazão de ajuste que a FV deverá abrir, quando a vazão de operação "Qo" assumir esse valor.



A implementação de uma malha de controle que realize esta função deve determinar o head e processá-lo para obter a vazão de ajuste "Qa". A vazão de operação "Qo" é comparada com a vazão de ajuste, caso "Qo" seja maior que "Qa" a FV deverá ficar fechada, ou seja, condição normal de operação. Na condição de "Qo" ficar igual ou menor que "Qa" a FV deverá abrir, mantendo-se a vazão na sucção do compressor igual a vazão de ajuste.

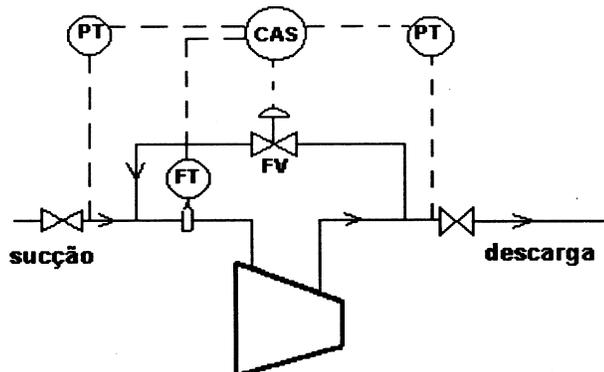
Uma vez sabendo que o head é diretamente proporcional a razão de compressão ($P2 / P1$) e os demais parâmetros praticamente são constantes (n , PM , R e $T1$) é instalado um transmissor de pressão na sucção e outro na descarga do compressor. Os sinais desses transmissores são enviados para um Controlador Anti-Surge "CAS", onde são processados para obter a vazão de ajuste. Atualmente em alguns painéis de turbocompressores, os controladores (CAS) são implementados através de programas no próprio PLC.

No "CAS" é implementada a equação da linha de controle de surge, que para simplificar podemos ilustrar como sendo uma reta, cuja equação é:

" $Y = aX + b$ ", onde "Y" é a razão de compressão, "X" é a vazão de ajuste, "a" é o coeficiente angular e "b" é o ponto de interseção da reta com o eixo Y.

O controlador, ao receber os sinais das pressões de sucção e descarga, efetua o cálculo da divisão entre $P2$ e $P1$ (Y), processa esse valor na equação e obtém a vazão de ajuste (X). O controlador também recebe o sinal da vazão na sucção do compressor "Qo", que é comparada com ponto de ajuste "Qa". No caso de operação normal "Qo" deve ser maior que "Qa", pois em outra condição fica caracterizado que o ponto de operação está próximo ao surge. Nesse caso a FV deve se encontrar aberta de forma a manter a variável igual ao ponto de ajuste, ou seja, caso a variável se encontrar igual ou menor que a vazão de ajuste a FV deverá se encontrar aberta o suficiente para manter a vazão na sucção do compressor igual ao ponto de ajuste.

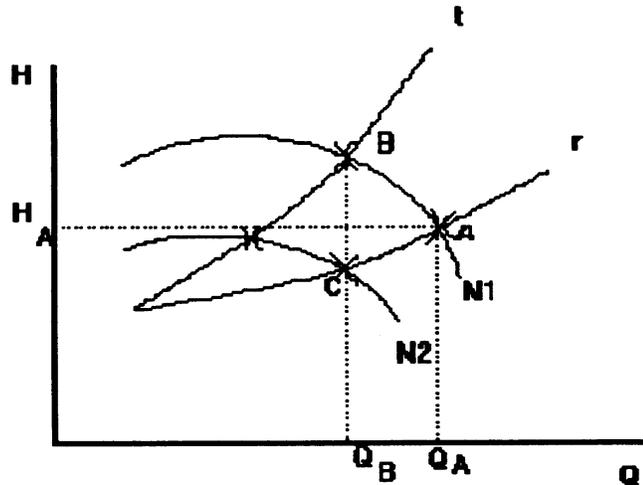
De acordo com o descritivo acima a malha de controle fica representada conforme o esquema a seguir.



SISTEMA DE CONTROLE DE CAPACIDADE

O controle de capacidade tem a finalidade de efetuar o ajuste da vazão de gás do processo com a curva de desempenho do compressor, de modo que a vazão comprimida fique dentro das condições de oferta e demanda de gás do sistema.

De acordo com a curva de $H \times Q$ abaixo temos o ponto de interseção (A) entre a curva do sistema (r) com a curva de desempenho do compressor (N1), que corresponde a vazão Q_A e Head H_A .



No caso de uma nova vazão de gás Q_B , como poderemos efetuar a interseção da curva do sistema com a curva de desempenho do compressor?

Existem 2 métodos a saber:

1 - Alteração da curva do sistema, que são:

a) Uma válvula na sucção que nesse caso poderia ser parcialmente fechada de modo a alterar a curva do sistema para (t), onde obteríamos o ponto de intercessão com a curva de performance em B.

b) Uma válvula na descarga que poderia ser parcialmente fechada de modo a alterar a curva do sistema conforme o item anterior.

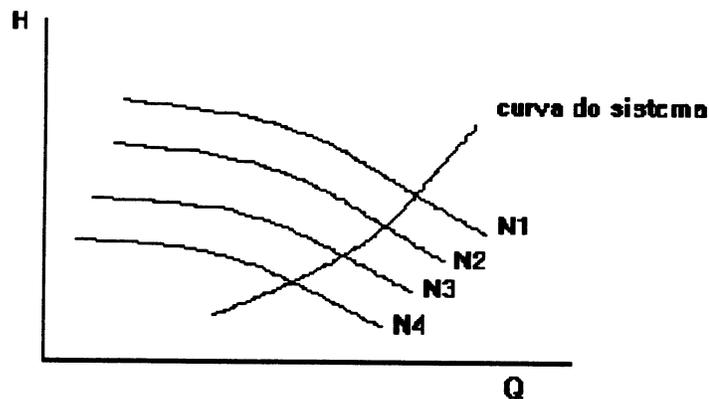
2 - Alteração da curva do compressor, que são:

a) Reduzir a rotação do compressor de modo a se obter uma nova curva de desempenho (N2), que promova a interseção com a curva do sistema (r) no ponto C.

b) Para compressores axiais temos também a possibilidade de através de mecanismo de acionamento, prover de palhetas móveis os primeiros estágios estatores, de forma a proporcionar novas curvas de desempenho, que podem ser correlacionadas variação de rotação.

Do ponto de vista energético o método 1 promove uma perda de energia em função das quebras de pressão. O método 2 é melhor, pois permite um ajuste econômico da potência requerida com a necessária para o sistema, fica então sendo a empregada para o controle de capacidade para os compressores centrífugos.

Conforme o gráfico abaixo, temos várias curvas de desempenho, sendo uma para cada rotação:



FILOSOFIA DE CONTROLE

A filosofia de controle consta em implementar uma curva do sistema conveniente para o processo e isso é proporcionado com a instalação de um PT e PIC com ação direta no coletor de sucção, um PT e PIC com ação inversa no coletor de descarga. Os sinais de saída desses PICs passam por um seletor de menor sinal (passa menor) que envia seu sinal de saída para o acionador (controlador de combustível) de modo a possibilitar os ajustes dos pontos de operação das pressões de sucção e descarga, que deverão ser mantidas pela variação da rotação do compressor, de tal maneira que o ponto de operação se desloque em cima da curva do sistema implementada.

A condição normal de operação fica estabelecida com:

- ◆ Pressão do coletor de sucção igual ao ponto de ajuste (set point) do PIC da sucção.
- ◆ Pressão do coletor de descarga igual ao ponto de ajuste (set point) do PIC da descarga.
- ◆ O ponto de ajuste (set point) do PIC do coletor de descarga deve ficar acima da pressão de gás lift, ficando configurado como uma pressão limite.

Caso ocorra uma queda na vazão de gás ofertada, a pressão de sucção irá cair acarretando um erro no PIC da sucção, comandando a desaceleração do compressor e em caso contrário irá acarretar a aceleração, desde que o erro considerado menor tenha sido referente ao PIC da sucção.

Caso ocorra uma que na demanda de gás comprimido, a pressão de descarga irá aumentar acarretando um erro no PIC da descarga, comandando a desaceleração do compressor e em caso contrário irá acarretar a aceleração, desde que o erro considerado menor tenha sido referente ao PIC da descarga.

Notas:

1- Os controladores anti-surge de cada compressor devem operar em automático durante todas as fases da operação (partida, operação e parada), para operá-lo em manual é necessário experiência por parte do operador e só deverá ocorrer em casos excepcionais . O controlador de capacidade pode operar ou não de acordo com a manobra operacional

2- Ao passar o controle de capacidade de manual para automático a variável deve estar igual ao ponto de ajuste.

SEQÜÊNCIA BÁSICA DE PARTIDA

- 1- Painel energizado.
 - 2- Verificação da rotação do GG, deve estar parado.
 - 3- Válvulas dosadora de gás combustível fechada.
 - 4- Abafadores (Dampers) de incêndio do casulo abertos.
 - 5- Sem sinal de paradas.
 - 6- Todos alarmes reconhecidos.
 - 7- Chaves no CCM em posição AUTO.
 - 8- Abafadores (Dampers) do duto principal aberto e do duto do recuperador de calor fechado (quando aplicável).
 - 9- Válvulas da planta de processo nas posições corretas. Independente da condição em que as plantas se encontram (pressurizadas ou despressurizadas).
 - 10- Ventilação/pressurização do casulo estabelecida.
 - 11- Parte a bomba de pré-lubrificação. Deve-se verificar as pressões de óleo e diferenciais de pressão nos filtros.
 - 12- Prepara o sistema de óleo de selagem.
 - 13- Inicia etapa de purga das plantas de processo (em média 5 minutos).
 - 14- Etapa de pressurização das plantas de processo, Nessa etapa é recomendado efetuar a drenagem das carcaças dos compressores, para evitar a presença de líquido durante a compressão.
 - 15- Parte o sistema de partida da turbina.
 - 16- Com a turbina rodando com 20 % NGG, inicia-se a etapa de purga das turbinas por um período de aproximadamente 2 minutos.
 - 17- Segue para a purga dos dutos de exaustão.
 - 18- Inicia-se o ciclo de ignição.
 - 19- Inicia-se a injeção de combustível.
 - 20- Certifica-se do inicio da chama, ciclo de combustão.
 - 21- A turbina entra na fase de aceleração, com aumento gradativo da injeção de combustível, segundo uma rampa preestabelecida.
 - 22- Aceleração concluída em 75 % de NGG.
 - 23- Desacopla o sistema de partida e desenergiza o motor de partida.
 - 24- É parada a bomba de pré/pós-lubrificação de óleo.
 - 25- Acelera até a condição de pronto para carga (aprox. 90% NGG)
 - 26- Libera a atuação automática das válvulas anti-surge e controle de capacidade.
- Deve-se verificar os parâmetros operacionais para certificar se estão enquadrados nos limites operacionais. Deve-se verificar vazamentos de gás, óleo, água e etc, e se atentar quanto aos ruídos estranhos.

SEQÜÊNCIA BÁSICA DE PARADA

Existem três modalidades de parada para os turbocompressores:

- ♦ Parada normal
- ♦ Parada por falha
- ♦ Parada de emergência

Aciona-se a botoeira de parada normal, a turbina irá desacelerar até a marcha lenta permanecendo nessa condição por um tempo estabelecido pelo programa de controle do turbocompressor (ciclo de arrefecimento - cooldown), para reduzir a temperatura e evitar o choque térmico na turbina, nessa etapa as válvulas de anti-surge irão abrir imediatamente de acordo com um comando do sistema de controle, sendo também desabilitado o sistema de controle de capacidade. Nesse caso as plantas de processo permanecerão pressurizadas por um tempo estabelecido pelo programa de controle do turbocompressor. Caso seja necessária a despressurização das plantas antes desse tempo, basta ser acionada a botoeira de parada de emergência.

A parada por falha se dará sempre que uma das proteções atuar (pressão muito alta, temperatura muito alta, nível muito alto, vibração muito alta e etc). Nesse caso o corte de combustível pode ser imediato ou não proporcionando a parada da máquina em arrefecimento ou não, dependendo da prioridade. A despressurização das plantas de processo poderá ou não ocorrer, dependendo da prioridade.

A parada de emergência se dá através da atuação de botoeiras específicas ou por falhas consideradas críticas (detecção de fogo no casulo, sobrevelocidade PT, Falha do PLC, ESD 3 na plataforma). Nesse caso além de efetuar o corte imediato do combustível, promove a despressurização das plantas de processo.

Em todas as paradas verifique as pressões de óleo de lubrificação, pois a bomba de pré/pós-lubrificação deverá ficar em operação para resfriar os mancais por um tempo estabelecido no programa de controle do turbocompressor (ciclo de pós-lubrificação).

O sistema de óleo de selagem permanecerá em operação até a completa despressurização das plantas de processo.

É importante lembrar que nas paradas que não se tenha alimentação de energia elétrica CA devemos verificar com atenção a pressão de óleo de lubrificação, que será mantida pela bomba de emergência CC (ciclo de pós-lubrificação de emergência).

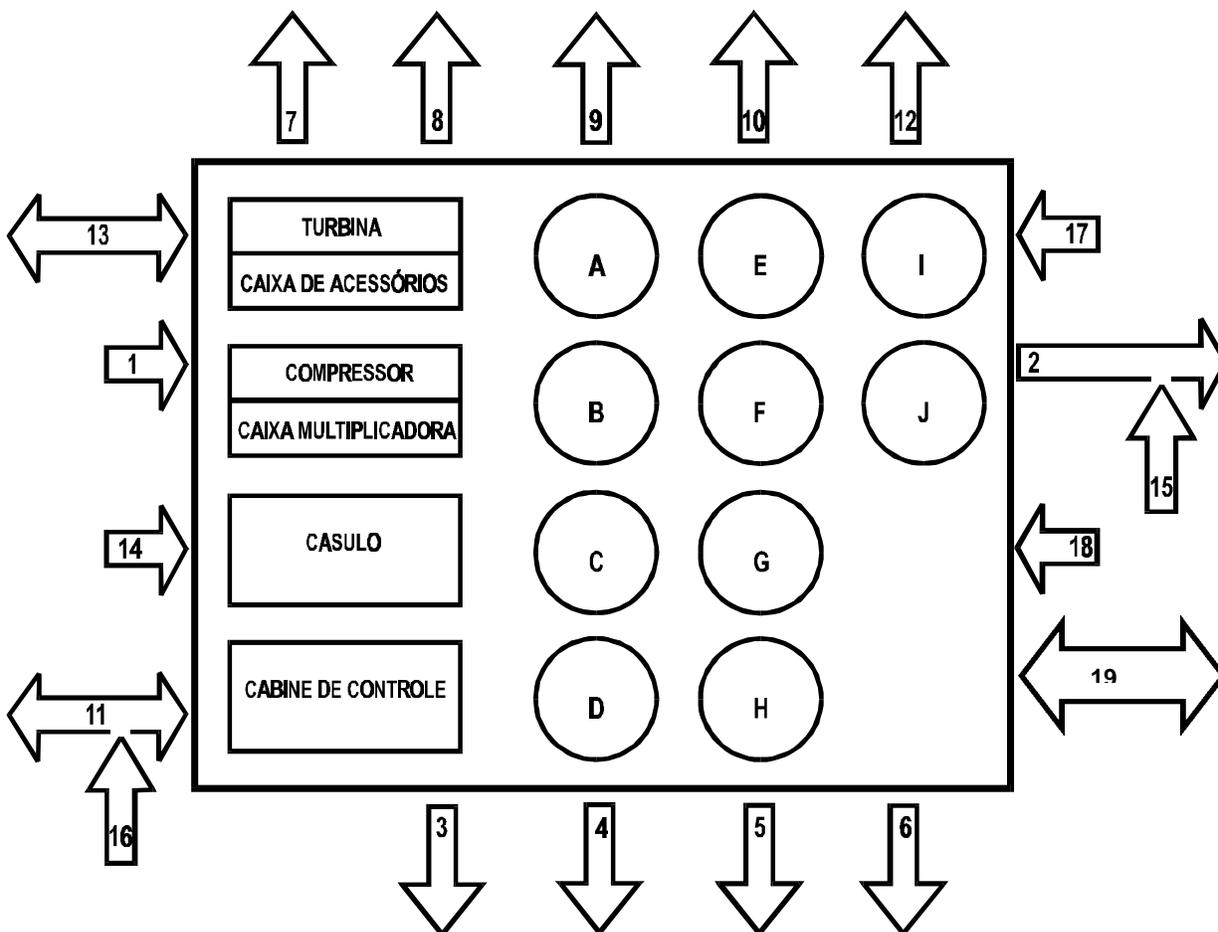
INSTALAÇÃO DE TURBOCOMPRESSORES

SISTEMAS AUXILIARES

- A - Sistema de Gás Combustível
- B - Sistema de Partida
- C - Sistema de óleo Lubrificante e Hidráulico
- D - Sistema de Ar da Turbinar
- E - Plantas de Compressão e Gás Combustível (Plantas de Processo)
- F - Sistema de óleo de selagem
- G - Sistema de Controle Anti-Surge e Capacidade
- H - Sistema de Segurança
- I - CCM e Banco de Baterias
- J - Sistema de Lavagem da Turbina

SISTEMAS PERIFÉRICOS

- 1 - Coletor de Sucção
- 2 - Coletor de Descarga
- 3 - Coletor de Dreno A.P
- 4 - Coletor de Dreno B.P
- 5 - Coletor de Dreno Fechado
- 6 - Coletor de Dreno Aberto
- 7 - Coletor de Alívio A.P.
- 8 - Coletor de Alívio B.P.
- 9 - Coletor de Alívio Atmosférico
- 10 - Linhas de Alívio Para Local Seguro
- 11 - Sistema de Água de Resfriamento
- 12 - Recuperador de Calor
- 13 - Intertravamento Lógico
- 14 - Sistema de Segurança
- 15 - Sistema de Injeção de Álcool
- 16 - Sistema de Hipoclorito
- 17 - Ar de Instrumentação
- 18 - Suprimento de Energia Elétrica
- 19 - Sistema de desidratação de gás e Regeneração de glicol.



GUIA PARA LEVANTAMENTO DE DADOS DE TURBOCOMPRESSORES

TURBINA A GÁS

1) TURBINA

- Marca(fabricante) GG
- Marca(fabricante) PT
- Modelo
- Potência ISO
- Eficiência térmica
- Tipo
- Mancais (tipo e números)
- Compressor de ar
 - . tipo
 - . número de estágios
 - . materiais
 - . relação de compressão
 - . vazão mássica
 - . Palhetas estatoras guias de entrada - VIGVs (variable inlet guide vanes)
 - . Válvulas anti-surge (bleed valves)
- Câmara de Combustão
 - . tipo
 - . número de câmaras
 - . número de injetores
 - . número de ignitores
- Combustível
- Roda da turbina HP ou GG (número de estágios, rotação)
- Roda da turbina LP ou PT (número de estágios, rotação)
- Limites operacionais, sistemas de instrumentação de proteção

2) SISTEMA DE ÓLEO DE LUBRIFICAÇÃO E COMANDO HIDRÁULICO

- Qual é o óleo (tipo)?
- Qual é a carga para abastecimento?
- Qual é o volume do reservatório?
- Quantas bombas?
- Qual o tipo de resfriador?
- Como é efetuado o controle de pressão e temperatura?
- Qual é o modelo do elemento filtrante, malha e quantos elementos p/ filtro?
- Quais são os limites operacionais do sistema?
- Conhecer o fluxograma e identificar os principais componentes que atendem ao sistema
- Conhecer a filosofia de operação do sistema

3) SISTEMA DE PARTIDA

- Motor de partida - tipo e potência
- Caso tenha conversor de torque, qual é o modelo?
- Como é o sistema de acoplamento?
- Quais são os componentes?

4) SISTEMA DE GÁS COMBUSTÍVEL

- Como é efetuado o controle de pressão do gás?
- Qual é o modelo da válvula dosadora?
- Como são acionadas as válvulas?
- Quais são os parâmetros que fazem parte da malha de controle?
- Quais são os limites operacionais?
- Quantas velas de ignição?
- Possui tocha para o ciclo de combustão inicial?

5) SISTEMA DE AR

- Quantos são os estágios da filtragem de ar?
- Quantos são os elementos por estágio?
- Quais são os limites operacionais do sistema de filtragem de ar ?
- Quais são as partes resfriadas da turbina?
- Qual é a origem do ar de selagem?

6) SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE CALOR

- Conhecer os componentes do sistema
- Capacidade térmica de troca de calor
- Qual é a filosofia de controle?
- Conhecer a instrumentação de proteção

7) CASULO

- Conhecer os sistemas de segurança e ventilação/pressurização do casulo
- Conhecer a filosofia de segurança
- Quantos ventiladores existem para ventilação do casulo?
- Como é o acionamento dos Abafadores (dampers) de admissão e exatão de ar do casulo?

8) CAIXA DE ACESSÓRIOS E CAIXA MULTIPLICADORA

- Quantos eixos, mancais?
- Quais são os equipamentos acionados?
- Qual é a instrumentação de proteção?
- Qual é a relação de multiplicação da caixa multiplicadora?

COMPRESSORES CENTRÍFUGOS

1) COMPRESSOR

- Fabricante
- Modelo
- Capacidade volumétrica
- Pressão de sucção (Ps), pressão de descarga (Pd)
- Temperatura de sucção (Ts)
- Número de estágios
- Tipo (carcaça vertical ou horizontal)
- Tipo dos mancais
- Curvas de desempenho (performance) dos compressores
- Limites operacionais, sistemas de proteção

2) SISTEMAS DE SELAGEM

- Qual o tipo dos anéis de labirinto da selagem interna?
- Qual é o tipo da selagem externa? Com óleo, selo seco com gás?
- Conhecer o fluxograma e identificar os principais componentes que atendem ao sistema de selagem externa (sistema de óleo de selagem ou sistema de gás de selagem) bem como a filosofia de operação.

3) SISTEMA DE ÓLEO DE LUBRIFICAÇÃO

- Qual é o óleo (tipo)?
- Qual é o volume do reservatório?
- Qual é a carga para abastecimento?
- Quantas bombas, tipo das bombas?
- Qual o tipo de resfriador?
- Como são efetuados os controles de temperatura e de pressão?
- Qual é o modelo do elemento filtrante, micragem e quantos elementos p/ filtro?
- Quais são os limites operacionais do sistema?
- Conhecer o fluxograma e identificar os principais componentes do sistema.
- Conhecer a filosofia de operação do sistema.

4) SISTEMA DE BALANCEAMENTO AXIAL

- Qual é tipo empregado?

5) PLANTAS DE PROCESSO DE COMPRESSÃO E GÁS COMBUSTÍVEL

- Conhecer os fluxogramas e identificar os principais componentes.
- Conhecer a filosofia de operação, limites operacionais, sistemas de proteção e segurança.
- Identificar as interligações dessas plantas com a planta de processo de produção.

6) SISTEMA DE CONTROLE ANTI-SURGE

- Identificar os componentes da malha de controle anti-surge.
- Conhecer os controladores anti-surge.

7) SISTEMA DE CONTROLE DE CAPACIDADE

- Identificar os componentes da malha de controle de capacidade (PTs, PICs com seletor de menor).
- Conhecer a filosofia de controle. Controla tendo como referência a pressão de sucção ou descarga? Efetua a divisão de carga (Load Share) quando operando com TCs em paralelo?

CABINE DE CONTROLE

- Identificar os painéis da cabine de controle
- Identificar o sistema de segurança
- Conhecer a operação do painel de controle do turbocompressor
- Conhecer a seqüência lógica de partida e parada
- Conhecer a filosofia de regulação da turbina

OPERAÇÃO

- 1) Elaborar uma lista de preparativos para partida.
- 2) Elaborar procedimentos operacionais.
- 3) Elabora as rotinas operacionais
- 4) Elaborar as planilhas de acompanhamento operacional (REGISTRO DE PARTIDAS E PARADAS, FOLHA DE LEITURA, SUBSTITUIÇÃO DE ELEMENTOS FILTRANTES, CONSUMO DE ÓLEO DE LUBRIFICAÇÃO E SELAGEM, RELATÓRIO DE PENDÊNCIAS, LAVAGEM DO COMPRESSOR DE AR DA TURBINA, E ETC.).

DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE DAS TURBOMÁQUINAS

Para aumentarmos os índices de disponibilidade e confiabilidade de turbomáquinas deveremos jogar como um time, onde o objetivo deve ser comum a todos os jogadores que são as equipes de operação (OP) e as equipes de manutenção (TBM).

Como negócio o TBM deve:

Executar manutenção, especificar e prestar assessoria técnica no que concerne às turbomáquinas.

Dentre os fornecedores está a OPERAÇÃO, cujos os insumos são as informações operacionais. Para que o tratamento dessas informações gere relatórios e gráficos para abertura e tratamento dos planos de ação, fica salientado a necessidade da consistência dos dados informados.

Com o propósito de melhorar essa consistência devemos trabalhar para desenvolver habilidades e proporcionar a mudança de postura do operador com relação a operação e manutenção das turbomáquinas.

A habilidade está associada a técnica (experiência teórica e prática) e a postura está associada a atitude mediante as situações e no tratamento das rotinas.

Desta forma entendemos que as informações serão passadas com mais compreensão, proporcionando o aumento de sua consistência e facilitando o seu tratamento para análises.

A análise dessas informações fica também destacada pela equipe de operação uma vez que nessa situação o operador desenvolveu condição para tal.

Neste contexto deveremos usar algumas ferramentas para aquisição e tratamento das informações pertinentes as turbomáquinas.

Voltamos a destacar a importância da consistência dos dados lançados nessas ferramentas por parte da operação.

Abaixo destacamos algumas ferramentas com seus empregos de forma a proporcionar a compreensão de suas importâncias.

O QUE ? FERRAMENTAS	PORQUE ?	QUANDO ?	COMO ?	ONDE ?	QUEM ?
Folha de leitura	Acompanhamento dos parâmetros operacionais.	Periodicamente	Registrando, comparando, verificando tendências e limites operacionais	Formulário padrão para cada TC.	Responsável pelo TC no turno.
REM	Acompanhamento das falhas e status operacional das turbomáquinas.	Sempre que houver uma mudança do status operacional segundo os critérios preestabelecidos.	Registrando.	REM/SIMP	Responsável pelo TC e que seja cadastrado no REM/SIMP, com auxílio de um representante do TBM.
Relatório de pendências	Agilizar o acompanhamento das pendências e facilitar a elaboração dos planos de ação para saná-las.	Sempre que for incluída ou excluída uma pendência.	Registrando ou excluindo uma pendência.	Nas planilhas de acompanhamento operacional.	Responsável pelo TC no turno
Procedimento operacional	Padronizar as manobras operacionais para reduzir as falhas, os riscos e otimizar os recursos necessários.	Nas manobras operacionais.	Elaborando, aplicando revisando os procedimentos.	Nas unidades operacionais.	Responsável pelo sistema do compressão com apoio da TBM.
Instrução operacional	Evitar falhas operacionais ou danos materiais e humanos.	Sempre que se tenha uma condição anormal e temporária no processo e/ ou na máquina.	Elaborando e aplicando as instruções.	Nas unidades operacionais.	Responsável pelo sistema de compressão com apoio do TBM.
Acompanhamento da preventiva	Monitorar o desgaste dos componentes, prover de dados para análises de falhas e etc.	De acordo com a necessidade operacional.	Registrando em um formulário próprio.	Nos TCs.	Responsável pela preventiva.
Rotinas operacionais	Gerar cuidados operacionais e de manutenção visando a manutenção da operacionalidade e a vida útil dos equipamentos	De acordo com as frequências preestabelecida.	Elaborando e aplicando e revisando as rotinas.	Nas unidades operacionais.	Responsável pelo sistema de compressão com apoio do TBM
Planilhas para acompanhamento operacional	Registrar partidas e paradas com os eventos, causas, observações; troca de elementos filtrantes (óleo, ar, gás); abastecimento de óleo de lubrificação, hidráulico, selagem, lavagem da turbina e etc.	Quando ocorrer o evento.	Registrando nas planilhas de acompanhamento operacional.	Nas planilhas, no computador	Responsável pelo sistema de compressão com apoio do TBM

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Livro Compressores Industriais – Eng.º Paulo Sérgio B. Rodrigues - PETROBRAS
- Manuais de treinamento, Operação e Manutenção de fabricantes de turbinas a gás e compressores centrífugos
- Apostilas de treinamento/Manuais de operação elaboradas pelos Técnicos de Operação
 - ◆ José Guilherme Monteiro Paixão – UN-BC/ATP-S/TBM
 - ◆ José Roberto Carneiro Cardoso – UN-BC/ATPS-MRL/TBM
 - ◆ Cleuber Pozes Valadão – UN-RIO/ATP-MLS/TBM