

Turboexpansor para Recuperação da Energia dos Gases de Combustão Efluentes de UFCCs

1. Introdução

Há um movimento internacional dos refinadores em reduzir a dependência de energia elétrica externa, de fornecimento de concessionárias, recuperando e aproveitando a energia disponível no próprio processo.

Nesta situação, uma área de especial interesse é a de recuperação de energia dos Gases de Combustão Efluentes as Seção de Conversão ou Conjunto Conversor das UFCCs- Unidades de Craqueamento Catalítico Fluido.

Tradicionalmente, a energia térmica, contida nos Gases de Combustão da UFCCs, é recuperada em forma de geração de vapor, nas Caldeiras de CO boiler ou de Caldeiras Recuperadoras de Calor *Waste Heat Boiler*.

Porém, esses gases também contêm um potencial de energia, associada à pressão e à vazão mássica do grande volume desses gases, que pode ser aproveitada em Turboexpansores.

Nota:

Um turboexpansor, também conhecido como turbina de expansão, é uma turbina de fluxo axial ou centrífugo, através da qual um gás de alta pressão é expandido para produzir potência, ou seja, converter a energia de pressão da corrente de gás em energia mecânica, frequentemente, usada para acionar um compressor ou um gerador de eletricidade,

Como o trabalho é extraído por expansão do gás pressurizado, a expansão é aproximada por um processo isentrópico (ou seja, um processo de entropia constante), e o gás de exaustão de baixa pressão da turbina está a uma temperatura mais baixa em relação à admissão, dependendo da pressão de operação e das propriedades do gás.

Os Turboexpansores atualmente em operação variam em porte de cerca de 7.500 kW (10.000 hp) a 37.300 kW (50.000 hp), sendo que em uma das maiores instalações de recuperação de energia FCC do mundo, o turboexpansor é de 112.000 kW (150.000 hp)

Referência: Turbo-expanders

<https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/power-and-heat-generation/turbo-expanders/>

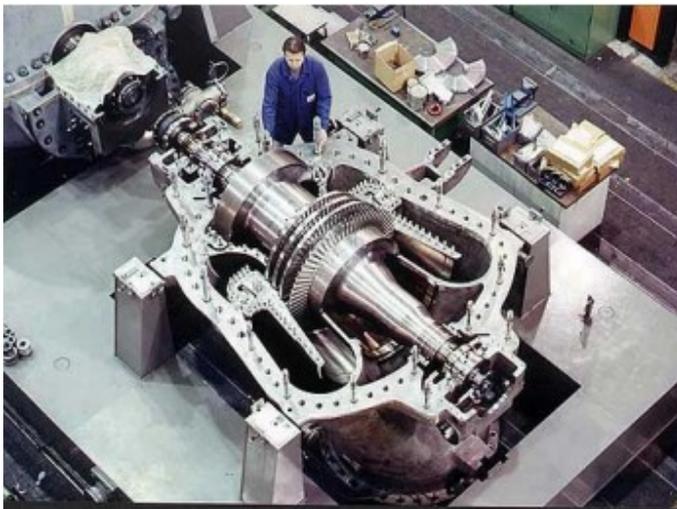


Foto de um Turboexpansor, mostrando a disposição dos internos

Fonte: Fluidodinâmica e erosão no sistema da válvula *main bypass* do turboexpansor de FCC

<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/valvula-main-bypass-do-turboexpansor-de-fcc.pdf>

O aproveitamento energético dos gases de combustão do processo de FCC trouxe um importante ganho em eficiência energética nos parques de refinaria por todo o mundo.

Isso foi possível através da introdução do Turboexpansor, após o Vaso de terceiro estágio de separação de catalisador, dos gases de combustão provenientes do Regenerador, que promove a retirada do catalisador residual, ainda arrastado e contidos nos gases.

Devido à sensibilidade do processo às mudanças nas diferenças de pressão, que ocorrem ao longo do circuito dos gases, e de possíveis problemas ou falhas do Turboexpansor, um rápido e eficiente controle, através de válvulas tipo borboleta *butterfly valve* de alta velocidade, é empregado.

O acionamento do obturador dessas válvula e o controle são exercidos por uma Estação de Atuação e Controle Eletrohidráulica dedicada (*HPCU-Hydraulic Pressure and Control Unit*), isto é, independente para cada válvula.

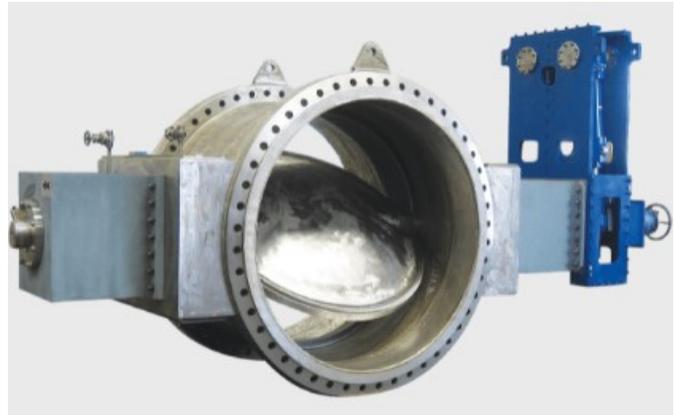
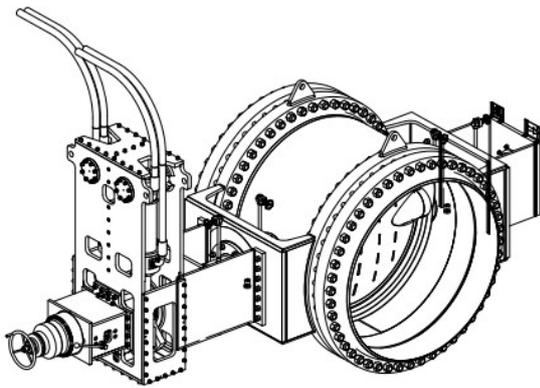


Ilustração e foto de uma válvula de controle tipo borboleta *butterfly valve*

A última etapa do aproveitamento energético, após a passagem dos gases pelo Turboexpansor, ocorre na Caldeira de CO, caso o Regenerador seja de queima parcial, em que há a absorção do calor proveniente da queima ou combustão total do gás CO existente, se o Regenerador é de queima total o aproveitamento é em um Recuperador de Calor *Waste heat boiler*.

O destino final desses gases é a Chaminé, que lança os gases resfriados e sem pressão para a atmosfera.

2. Referências

- Dissertação de tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro Fluidodinâmica e erosão no sistema da válvula *main bypass* do turboexpansor de FCC <http://tpqb.eq.ufrj.br/download/valvula-main-bypass-do-turboexpansor-de-fcc.pdf>
- Efficiency Improvement Project in a Power Recovery Unit at an Iberian Refinery [file:///C:/Users/joaob/Downloads/Dissertacao%20de%20Mestrado%20\(Leticia%20Carvalho%20-%2075233\).pdf](file:///C:/Users/joaob/Downloads/Dissertacao%20de%20Mestrado%20(Leticia%20Carvalho%20-%2075233).pdf)

3. Esquema típico de um FCC com o sistema de Turboexpansor

Para viabilizar o uso de um Turboexpansor, no aproveitamento energético dos gases de combustão, efluentes do Regenerador, é imprescindível a remoção física dos finos de catalisador, ainda presentes e arrastados junto com os gases.

A primeira remoção ocorre dentro do próprio Regenerador, através de uma série de ciclones, de dois estágios, 1º e 2º estágios, em que os gases são separados do catalisador.

Após essa primeira separação, os gases são dirigidos para um vaso, chamado Vaso de Terceiro Estágio de Separação, que é equipado com outra série de dispositivos internos, como ciclones, em que através da força centrífuga os finos de catalisador são removidos da massa de gases. Sem esse terceiro estágio, haveria a erosão crítica dos internos do Turboexpansor, devido à elevada abrasão, característica desse catalisador.

Assim, os gases de combustão *flue gas* provenientes do Regenerador da UFCC, resultado da combustão do coque presente no catalisador, passa por um Vaso de 3º Estágio de Separação de Catalisador residual, antes de ser dirigido para o Turboexpansor.

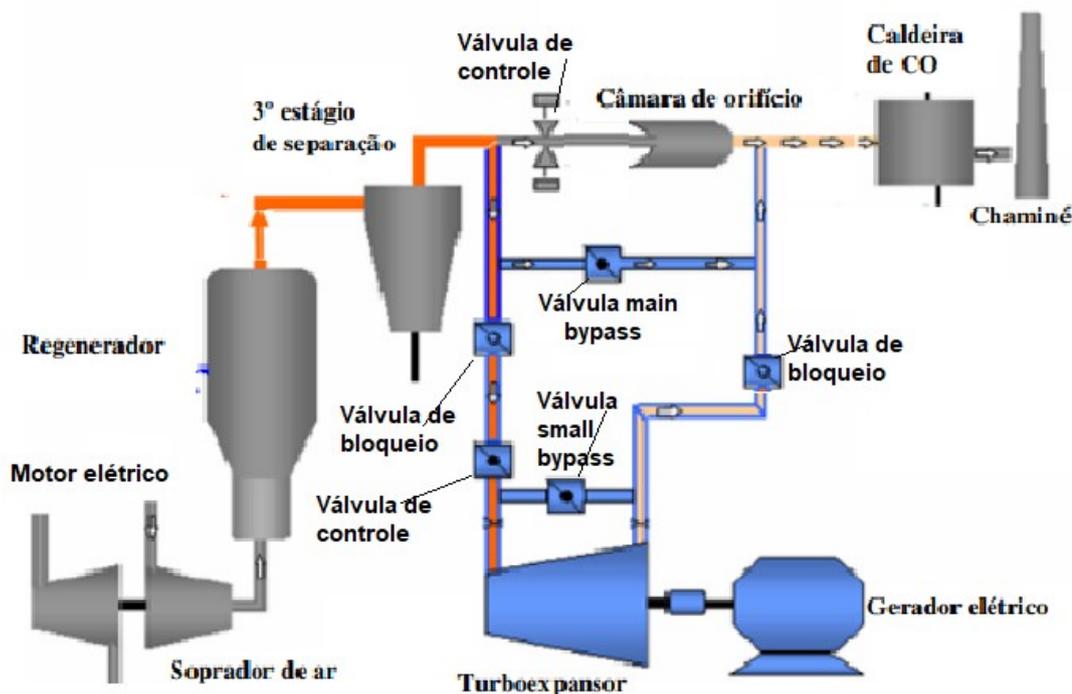


Ilustração dos equipamentos e válvulas do sistema de recuperação de energia dos gases de combustão

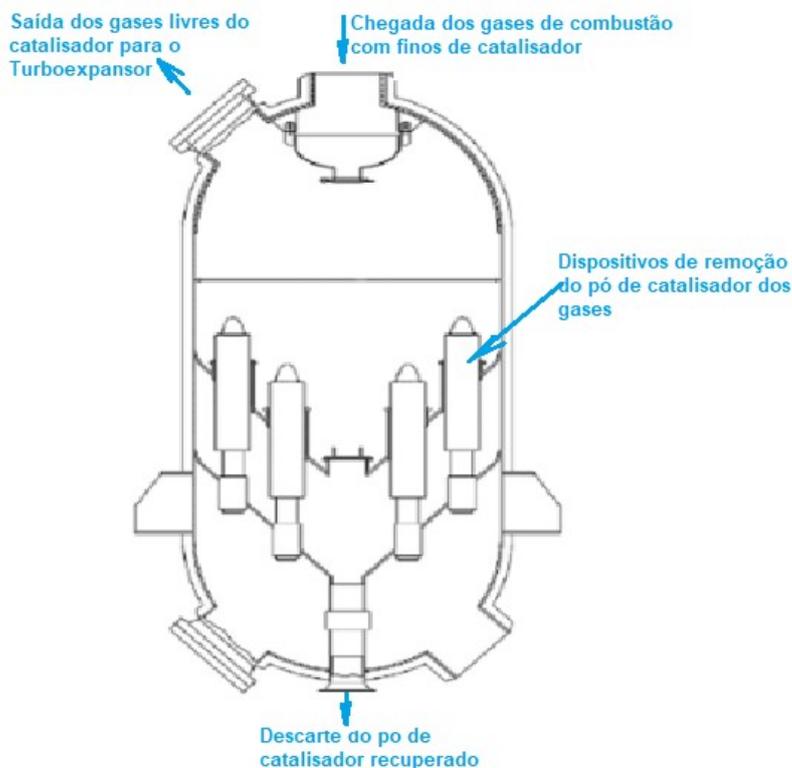


Ilustração do Vaso do 3º estágio de separação e remoção de catalisador dos gases de combustão

Nesse Vaso de 3º estágio, a separação possibilita a recuperação energética, porque a quantidade de particulado de catalisador que estaria ainda presente nos gases de combustão, sem esse vaso, causaria grande erosão nas pás ou hélices e nas paredes do turboexpansor e, além disso, ele possibilita o enquadramento das emissões dos particulados contidos nos gases dispersos na atmosfera, através da Chaminé, aos limites ambientais toleráveis.

O desenvolvimento tecnológico do processo de recuperação energética dos gases de combustão, após a eficiente recuperação dos finos de catalisador no Vaso de terceiro estágio de separação, possibilitou um avanço significativo, e apesar do alto custo de instalação do Turboexpansor no processo, sua utilização já é uma realidade nos parques de refino.

Nota:

Inicialmente, os projetos de FCC possuíam somente dois estágios de separação, dentro do Regenerador, para a recuperação dos finos de catalisador e mesmo que eles tivessem uma boa eficiência de separação, não era suficiente para proteger o Turboexpansor de excessiva erosão, uma vez que as partículas menores que 50 µm eram difíceis de recuperar.

Em 1963, a Shell resolveu o problema dos finos de catalisador, adicionando um Vaso de separação fora do Regenerador e esse 3º estágio de separação adicional, conhecido como *TSS-Third Stage Separator*, tornou possível a recuperação de energia dos gases de combustão efluentes do Regenerador..

Dependendo do projeto do Regenerador e do sistema de separação, um *TSS* é capaz de reduzir os finos de catalisador para menos de 1% em massa, com finos da ordem de grandeza de 5 µm.

Nos FCCs que não contemplem esse sistema de aproveitamento energético e o Regenerador seja de queima parcial, os gases de combustão, ainda ricos em gás CO, são simplesmente enviados para queima em uma caldeira de CO *CO boiler*, após a sua passagem pela Câmara de Orifícios.

Nota:

A UFCC pode ser de Regenerador de queima total ou de queima parcial, a depender da temperatura da regeneração.

Quando a temperatura interna de operação do Regenerador está na faixa de 730°C a 760°C, o Regenerador é considerado de queima total, isto é, os produtos de combustão são CO₂ e H₂O.

Abaixo desses valores de temperatura, tem-se a queima parcial, ou seja, há a presença de gás CO nos gases de combustão.

Quando o Regenerador é de queima parcial, a UFCC inclui uma Caldeira de CO, para reaproveitar o calor sensível dos gases da combustão e possibilitar a queima do CO.

Se é de queima total, há apenas um Recuperador de Calor no circuito, sem queima adicional.

A Câmara de Orifícios é um torre ou coluna, com vários pratos perfurados, de orifícios calibrados, que promove a despressurização dos gases de combustão, antes de serem admitidos na Caldeira de CO e, finalmente, descartados pela Chaminé para a atmosfera.

Nos FCCs que contemplam a recuperação de energia, a Câmara de Orifícios também pode ser utilizada e serve como alternativa à passagem dos gases, para a Caldeira ou Chaminé, criando um *bypass* do Turboexpansor, quando ele entra em parada de manutenção ou de emergência.



Ilustração da Câmara de Orifícios ou pratos perfurados

4. Configurações do Turboexpansor e estratégias de operação

O Turboexpansor pode ser utilizado para a geração de energia elétrica ou também como força motriz de acionamento do Soprador de ar *air blower* do Regenerador, que promove a queima do coque impregnado no catalisador, após o craqueamento da carga.

O Turboexpansor absorve a energia disponível nos gases de combustão através da redução da sua pressão e do seu calor sensível.

As válvulas de controle, tipo borboleta de alta velocidade, do sistema do Turboexpansor servem para o ajuste de pressão, ao longo do sistema e da geração de energia.

Existem muitas possibilidades de configurações de sistemas de recuperação de energia que podem ser incorporados em unidades de FCC novas ou não.

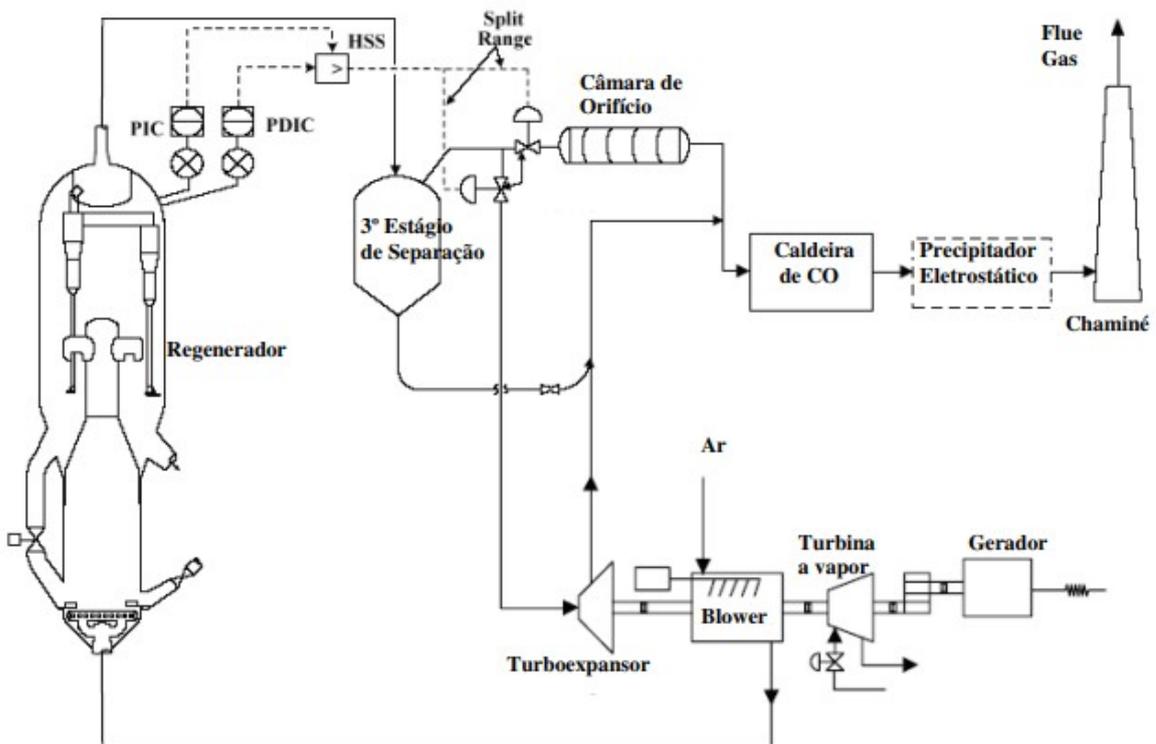
Porém, basicamente há duas configurações de recuperação de energia de FCC a considerar:

- a- Turboexpansor conectado diretamente ao Soprador de ar da UFCC;
- b- Turboexpansor conectado diretamente a um Gerador elétrico.

As duas configurações de funcionamento ocorrem na prática, dependendo do tipo de projeto da UFCC, da carga da unidade, da continuidade operacional requerida e da análise do custo & benefício da instalação.

4.1. Configuração com Turboexpansor acoplado ao Soprador de ar

Esta configuração, historicamente, é mais comum nos sistemas de recuperação de energia de UFCCs mais antigos e o arranjo é como o esquema a seguir.



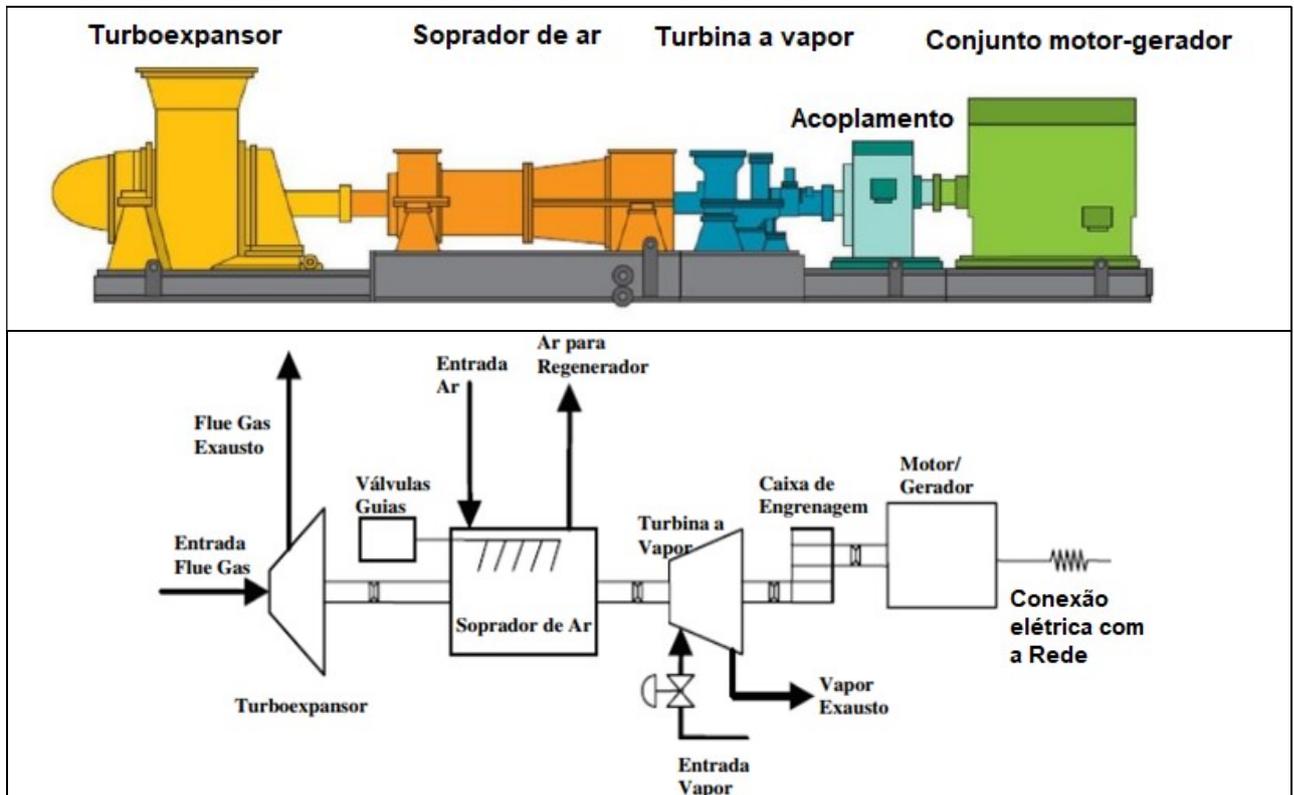
Configuração FPR-Full Power Recovery de Turboexpansor.

Nesse caso, o Turboexpansor é acoplado, diretamente, ao Soprador de ar do FCC, fornecendo energia direta ao eixo, utilizando somente o excedente para a geração de eletricidade no motor/gerador, quando operando no modo Gerador. A transferência direta de energia para o acionamento do Soprador de ar minimiza as perdas, mostrando ser esta configuração muito eficiente.

Nesse arranjo, há também uma Turbina a vapor, normalmente de multi-estágios, que é responsável por fornecer energia mecânica ao Soprador de ar durante a partida *start-up* da UFCC, visto que ainda não há vazão de gás de combustão para o acionamento do Turboexpansor.

Somente depois que a quantidade de gases é suficiente e o processo está em condições estáveis, é que o Turboexpansor já comissionado parte.

A partir do momento em que o Turboexpansor começa a funcionar, a energia produzida pela Turbina a vapor é transformada em energia elétrica, pelo motor/gerador. Outra função da Turbina é compensar a eventual queda da potência produzida pelo Turboexpansor e fornecida ao Soprador de ar.



Esquema de recuperação de energia conhecido como *FPR-Full Power Recovery*.

Como o Soprador de ar está acoplado diretamente ao eixo do turboexpansor, no evento de descarte súbito de energia, que libere o eixo, o Soprador atua como freio de proteção, contra a possível sobrevelocidade do Turboexpansor.

O inconveniente do acoplamento do Soprador de ar, no mesmo eixo do Turboexpansor, é que se o Turboexpansor requerer manutenção ou reparo, por ocorrência de problema mecânico que implique em parada *shutdown* da máquina, isto provoca a parada da UFCC, e os custos da interrupção da produção da UFCC são substanciais, indo contra as vantagens econômicas oriundas do sistema de recuperação de energia *FPR*.

Devido a isso, essa configuração *FPR* caiu em desuso, e várias refinarias estão desacoplando o Soprador de ar do eixo do Turboexpansor, levando, com isso, à segunda configuração exposta a seguir..

4.2. Configuração com Turboexpansor acoplado a Gerador para a produção de energia elétrica.

Nesta configuração, o Turboexpansor é conectado a um Gerador elétrico, que atende às necessidades da planta e exporta o excedente para a rede da concessionária.

Assim, a energia de turboexpansão é aproveitada exclusivamente para fins de geração de energia elétrica .

Já o Soprador de ar é acionado por outra máquina, podendo ser um motor elétrico ou uma turbina a vapor.

Esse tipo de arranjo, em que toda a energia dos gases de combustão do FCC é destinada para a geração de eletricidade é conhecido como *TPG-Total Power Generation*.

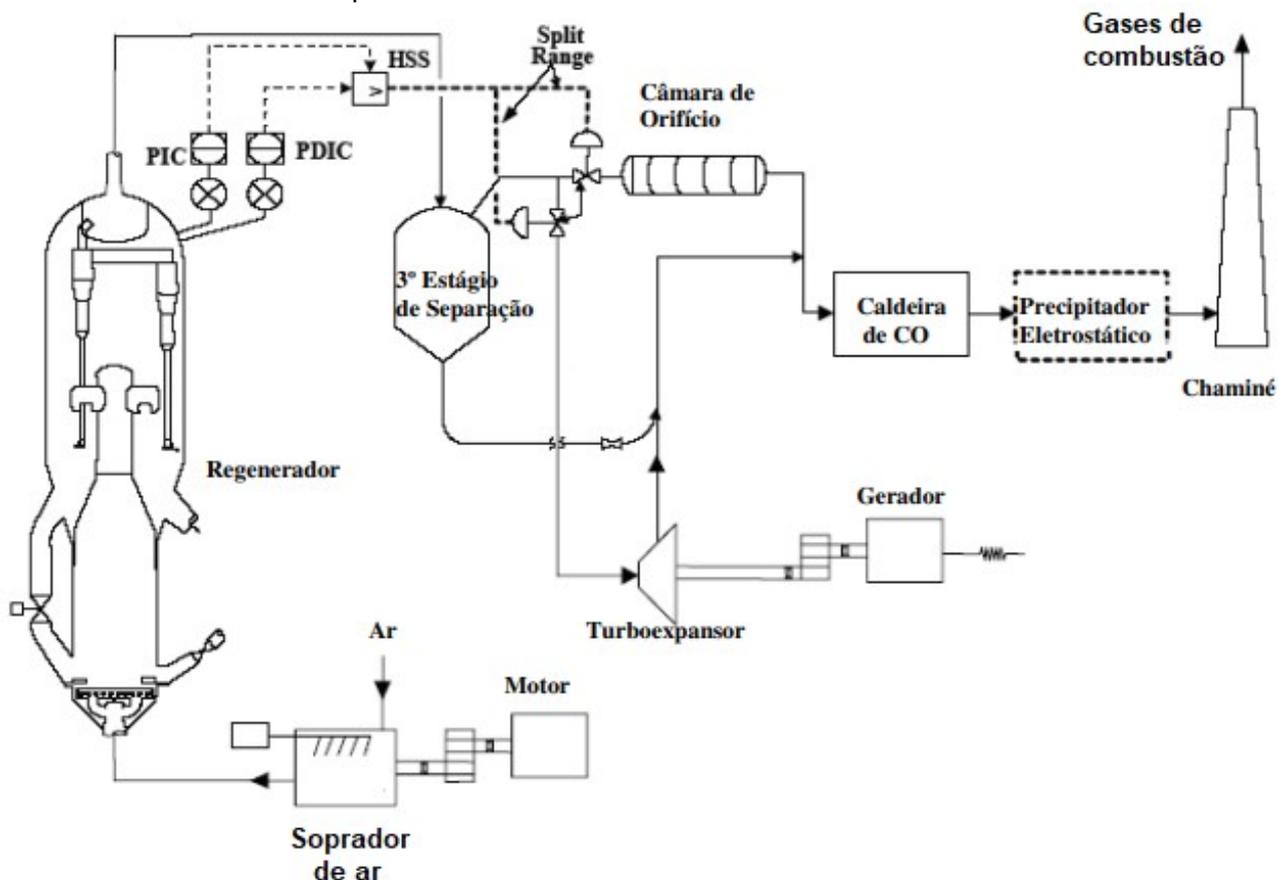
Uma vantagem deste arranjo sobre o anterior é a possibilidade de intervenções, para manutenção no Turboexpansor com o FCC mantido em operação, através da utilização de válvulas de isolamento, isto é, de bloqueio seguro *man safe*, à entrada e à saída do Turboexpansor.

Por outro lado, com a remoção do Soprador de ar do acoplamento pelo Turboexpansor, a carga de eixo associada ao Soprador de ar é eliminada, acarretando menor inércia desse arranjo e gerando, potencialmente, maiores problemas de possível sobrevelocidade, do que o arranjo anterior *FPR*.

A principal preocupação dessa configuração é que no evento de desacoplamento súbito do Gerador à rede, a carga no eixo do Turboexpansor cai imediatamente a praticamente zero, e o Turboexpansor entra em processo de sobrevelocidade excessiva de maneira descontrolada.

Como consequência, maiores são as exigências sobre o sistema de controle, principalmente no que diz respeito ao tempo de resposta, para lidar com os cenários de descarte de carga ou quebra de acoplamento, que são os principais eventos causadores de sobrevelocidade.

Isto obriga ao uso de sistemas de proteção, compostos de válvulas de controle de ação rápida e de atuadores eletrohidráulicos de alta velocidade, para controle, abertura ou fechamento, com o objetivo de rapidamente desviar o fluxo dos gases de combustão para fora do Turboexpansor e desacelerar o “trem” de máquinas.



Configuração *TPG-Total Power Generation* de Turboexpansor.

4.3. Vantagens e desvantagens das Configurações do Turboexpansor

Em seguida, é apresentada uma tabela, resumindo os prós e os contras de cada configuração.

Configuração: Turboexpansor acionando Soprador de ar		Configuração: Turboexpansor acionando Gerador elétrico e Soprador de ar independente do Turbo	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Menor área requerida para instalação; • Sincronização do gerador mais simples; • Menor probabilidade de ocorrência de sobrevelocidade; • Sistema de controle do turboexpansor com menor complexidade; 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade de intervenção no Turboexpansor com FCC em operação; • <i>Trip</i> do Turboexpansor pode levar à parada do FCC; • Fator de potência reduzido; • Apresenta problemas de vibração em determinada condição de operação; • Maior dificuldade de implantação em sistemas existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de intervenção no Turboexpansor com FCC em operação, utilizando-se de válvula de isolamento; • <i>Trip</i> do turboexpansor não leva à parada do FCC; • Fator de potência elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior área requerida para instalação; • Sincronização exige maior sofisticação do sistema de controle do Turboexpansor; • Maior probabilidade de ocorrência de sobrevelocidade; • Sistema de controle do Turboexpansor de maior complexidade.

5. Válvulas de controle e bloqueio do Sistema do Turboexpansor

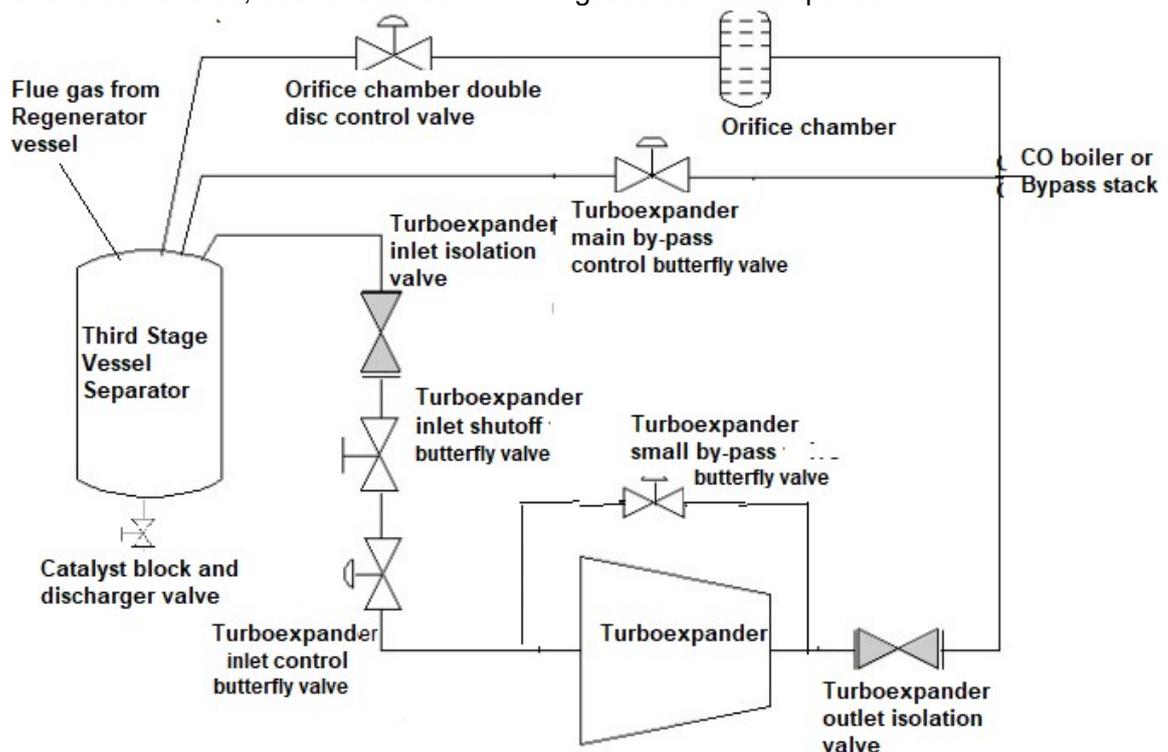
O arranjo das válvulas de sistema de controle e proteção do Turboexpansor inclui as válvulas de controle e as válvulas de isolamento da máquina.

As válvulas devem ser de ação ultra rápida, os atuadores dessas válvulas são do tipo eletrohidráulicos, de alta velocidade, para controle, abertura ou fechamento, com o objetivo de rapidamente direcionar o fluxo dos gases de combustão para fora do Turboexpansor, adequando a demanda e desacelerar o “trem” de máquinas.

Independentemente do tipo de arranjo, as válvulas no processo devem seguir os seguintes requisitos de controle e proteção:

- Rejeitar as perturbações originadas pela operação do Turboexpansor de modo a manter a estabilidade do Conjunto Conversor;
- Manter a rotação do Turboexpansor de acordo com a geração requerida, quando operando em “paralelo” com a concessionária;
- Limitar velocidade máxima do Turboexpansor durante transientes gerados pelo descarte de carga ou trip do equipamento.

O arranjo mais seguro do sistema de controle é com sensores de velocidade do Turboexpansor, que aciona as válvulas, desviando a corrente de gases do Turboexpansor.



Resumidamente, a função de cada válvula é:

1. As válvulas de isolamento estanque *man safe*, à entrada e à saída do Turboexpansor “inlet and outlet isolation valves” são do tipo “*Goggle Valve*”, e a função é isolar, completamente, o Turboexpansor do restante da unidade, para a execução dos serviços de manutenção e reparo.
2. A válvula de bloqueio operacional “inlet shutoff” é do tipo “*butterfly shut off valve*” e a função é o bloqueio operacional do Turboexpansor nos eventos de *trip* da máquina.
3. A válvula de controle “inlet control” é do tipo “*butterfly control valve*” e a função é o controle da vazão de gases, através do Turboexpansor, na medida da demanda de potência requerida.
4. A válvula de controle “main by-pass” é do tipo “*butterfly control valve*” e a função é desviar parte dos gases do Turboexpansor, para o circuito da Câmara de Orifícios e Caldeira, conforme o controle de vazão demandada pela máquina.
5. A válvula de controle “trim or small by-pass” é do tipo “*butterfly control valve*” e a função é ajustar a vazão dos gases, durante a partida do Turboexpansor, e sincronizar com o Gerador elétrico.
6. A válvula de controle na entrada da Câmara de Orifícios é do tipo “*double disc slide valve*” e a função é desviar a totalidade dos gases para o circuito Câmara de Orifícios e Caldeira, nas situações de parada total do Turboexpansor.
7. A válvula de descarte de finos de catalisador na saída do Vaso de 3º estágio é do tipo placa corrediça ou de esfera e a função é permitir a retirada do pó de catalisador acumulado no fundo do Vaso de 3º Estágio de separação.

Todos os dutos, tubulações e válvulas, a partir do Vaso de 3º estágio de Separação de Catalisador até ao Turboexpansor, devem ser de “parede quente”, isto é, sem qualquer revestimento refratário interno, pois, há o risco de desprendimento desse refratário e danificar as palhetas do Turboexpansor. Com isso, os materiais construtivos devem ser de Aço Inoxidável Austenítico Tp304H, resistente às elevadas temperaturas do processo.
