

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2011

JEFFERSON MOLAS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM TURBOEXPANSOR NA REFINARIA
DO PLANALTO PAULISTA – REPLAN COM OBJETIVO DO
APROVEITAMENTO DA ENERGIA CONTIDA NOS GASES
RESIDUAIS DO FCC – *FLUID CATALYTIC CRACKING* NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Graduação
apresentado ao Conselho de Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia Mecânica.

Orientador: José Nédilo Carrinho de Castro

Guaratinguetá

2011

Molas, Jefferson

M717i Implementação de um tuboexpansor na refinaria do Planalto Paulista – REPLAN com objetivo do aproveitamento da energia contida nos gases residuais do FCC – Fluid Catalytic Cracking na geração de energia elétrica / Jefferson Molas – Guaratinguetá : [s.n], 2011.

49 f : il.

Bibliografia: f. 48

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Prof. Dr. José Nédilo Carrinho de Castro

1. Aproveitamento energético 2. PETROBRÁS I. Título

CDU 620.91

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM TURBOEXPANSOR NA REFINARIA DO
PLANALTO PAULISTA – REPLAN COM OBJETIVO DO
APROVEITAMENTO DA ENERGIA CONTIDA NOS GASES RESIDUAIS
DO FCC – FLUID CATALYTIC CRACKING NA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**


JEFFERSON MOLAS

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


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ NÉDILLO CARRINHO DE CASTRO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. PETRONIO MASANOBU TANISHO
UNESP-FEG


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

JEFFERSON MOLAS

NASCIMENTO	11/01/1986
FILIAÇÃO	José Molas Maria Teresa Genari Molas
2006/2011	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram e confiaram na minha capacidade, em especial a minha família, com meu pai José Molas, minha mãe Maria Teresa Genari Molas e minha irmã Gisele Molas.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais José e Maria Tersa, minha irmã Gisele e a minha avó Teresa que acreditaram no meu potencial e sempre me apoiou;

aos meus amigos da república ToaToa, que se tornaram minha segunda família neste período em que estudei em Guaratinguetá.

ao meu Professor Orientador José Nédilo Carrinho de Castro, que me acompanha e me orienta desde 2007, ano em que eu ingressei no Grupo PET.

aos professores desta Universidade, que sem eles eu não teria as condições necessárias de me tornar um bom engenheiro mecânico, com bom embasamento técnico e teórico.

a Potencial Engenharia S.A., empresa pelo qual estou estagiando, agradeço a todos os que colaboraram para a realização deste trabalho, em especial, ao senhor Agostinho Marcon, que vem me acompanhando e me ensinado, ao longo deste ano, sobre funcionamento do Turboexpansor, além de outros assuntos relacionados a engenharia.

“Ele não sabia que era impossível. Foi lá e fez”

Jean Cocteau

MOLAS, J., Implementação de um Turboexpansor na Refinaria do Planalto Paulista – REPLAN com o objetivo do aproveitamento da energia contida nos gases residuais do FCC - *Fluid Catalytic Cracking* na geração de energia elétrica. 2011. Monografia (graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Com o crescimento substancial da economia brasileira nos últimos anos, o consumo de energia elétrica aumentou de maneira significativa, porém houveram relativamente poucos investimentos nessa área no Brasil. A Petrobras, por ser uma empresa de energia, esta atenta as tecnologias presentes no mercado que busca o aproveitamento da energia contida nos processos químicos do beneficiamento do petróleo. Este trabalho aborda justamente este ponto, o de aproveitamento da energia contida nos gases residuais do craqueamento catalítico na geração de energia elétrica. O meio para que isso ocorra é a utilização do Turboexpansor, um equipamento que trabalha apenas com um pequeno diferencial de pressão e uma vazão grande volumétrica, sem ao menos necessitar de combustível adicional para gerar energia. Este processo é um meio de geração de energia elétrica eficiente e ecologicamente correto, pois aproveita uma fonte de energia que atualmente esta sendo desperdiçada.

PALAVRAS-CHAVE: Turboexpansor, Aproveitamento energético, Refinaria REPLAN, Petrobras.

MOLAS, J., Implementation of a Turboexpander in the Planalto Paulista Refinery - REPLAN with the aim of harnessing the energy contained in waste gases from the FCC – Fluid Catalytic Cracking the generation of electricity. 2011. Monograph (Graduation in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

With the substantial growth of the Brazilian economy in recent years, electricity consumption increased significantly, but there were relatively few investment in this area in Brazil. Petrobras, being an energy company, is looking at the technologies on the market that seeks to use the energy contained in the chemical processing of petroleum. This paper addresses precisely this point, the use of the energy contained in waste gases from the catalytic cracking in the generation of electricity. The means for this to occur is the use of Turboexpander, a device that only works with a small differential pressure and a large volume flow, without the least require additional fuel to generate energy. This process is a means of generating energy efficient and environmentally friendly, because it takes an energy source that currently is being wasted.

KEYWORDS: Turboexpander, Energy Recovery, REPLAN Refinery, Petrobras.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Principais componentes no FCC	17
FIGURA 2 -	Sentido do fluxo de gás no Turboexpansor (DRESSER RAND)	19
FIGURA 3 -	Câmara de Orifício	22
FIGURA 4 -	Maquete da Unidade de FCC (POTENCIAL ENGENHARIA S.A.)	23
FIGURA 5 -	Operação 1 (DRESSER RAND)	25
FIGURA 6 -	Operação 2 (DRESSER RAND)	25
FIGURA 7 -	Operação 3 (DRESSER RAND)	26
FIGURA 8 -	Operação 4 (DRESSER RAND)	26
FIGURA 9 -	Operação 5 (DRESSER RAND)	27
FIGURA 10 -	Válvula PDV com Atuador (http:// www.remosa-valves.com/photos/butterfly/13).....	28
FIGURA 11 -	Juntas de expansão (POTENCIAL ENGENHARIA S.A.)	30
FIGURA 12 -	Maquete da Unidade de FCC (POTENCIAL ENGENHARIA S.A.)	31
FIGURA 13 -	Gráfico de seleção de Turboexpansore Dresser-Rand (EXPANDERS DRESSER)	33
FIGURA 14 -	Representação do Turboexpansor (DRESSER RAND).....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis do processo de redução de pressão em condições normais de operação.	33
Tabela 2 – Composição do gás que flui para o Turboexpansor (Petrobras)	35
Tabela 3 – Constantes para cada substância do gás (WYLEN, G. J. V.).	36
Tabela 4 – Dados para cálculo de $T_{méd}$	38
Tabela 5 – C_{p0} de cada substância que compõe o gás.....	37
Tabela 6 – Variação entálpica (Δh) de cada substância do gás.....	37
Tabela 7 – Ponderação da variação entálpica e a composição do gás	38

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
s	Segundo
kW	Quilowatt
°C	Grau Celsius
K	Kelvin
<i>h</i>	Hora
<i>min</i>	Minuto
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
<i>ton</i>	Tonelada
kgf	Quilograma força
<i>cm</i>	Centímetro
N ₂	Gás Nitrogênio
O ₂	Gás Oxigênio
H ₂ O	Água na forma Gasosa
SiO ₂	Gás Dióxido de Silício
CO	Monóxido de carbono na forma gasosa
CO ₂	Dióxido de carbono na forma gasosa
PR	Pressure Ratio
P_{ent}	Pressão de entrada
P_{sai}	Pressão de saída
P_{atm}	Pressão atmosférica
m_{total}	Vazão mássica total
m_{ar}	Vazão mássica de ar
A	Constante multiplicativa adimensional
T_{ent}	Temperatura de entrada
T_{sai}	Temperatura de saída
T_{med}	Temperatura média
W	Trabalho
Δh	Varição entálpica
Δh_{total}	Varição entálpica total
C_{p0}	Calor específico a pressão constante e nula
$f(T)$	Função da temperatura
h_T	Entalpia a uma dada temperatura
mol	Unidade de concentração molar
C_0	Valor constante
C_1	Valor constante
C_2	Valor constante
C_3	Valor constante
θ	Temperatura média dividida por mil
h_{ent}	Entalpia de entrada
h_{sai}	Entalpia de saída
T_0	Temperatura de referência para gases perfeitos
$x.\Delta h$	Ponderação da variação entálpica com a composição do gás

LISTA DE ABREVIATURAS

FCC	<i>Fluid Catalytic Cracking</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
PDV	<i>Pressure Differential Valve</i>
HV	<i>Hand Valve</i>
GOL	Gasóleo Leve
GOP	Gasóleo Pesado
XV	<i>Shutdown Valve</i>

SUMÁRIO

1	ENTENDIMENTO DO SISTEMA FCC (<i>Fluid Catalytic Cracking</i>)	16
2	FUNIONAMENTO DE UMA UNIDADE COM TURBOEXPANSOR.....	18
3	VANTAGENS NO INVESTIMENTO DESTA TECNOLOGIA.....	20
4	CONFIGURAÇÃO DA PLANTA.....	22
5	SISTEMAS MECÂNICOS DO TURBOEXPANSOR.....	24
5.1.	Válvulas.....	24
5.2.	Juntas de expansão	29
5.3.	Sistemas de contrapesos e molas.....	30
5.4.	Vaso de casca de noz.....	31
6	TURBOEXPANSOR EM QUESTÃO	33
7	GERADOR E REDUTOR DE VELOCIDADE	36
8	CÁLCULOS	37
9	COMISSONAMENTO, CONDICIONAMENTO E PRESERVAÇÃO	42
10	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	44
11	CONCLUSÕES, SUGESTÕES E COMENTÁRIOS FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	48
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	49

1 ENTENDIMENTO DO SISTEMA FCC (*Fluid Catalytic Cracking*)

O sistema de refino de petróleo é composto, basicamente, por três seções: pré-vaporização, destilação atmosférica e destilação a vácuo.

Inicialmente o petróleo passa por baterias de trocadores de calor, onde este troca calor com produtos já acabados, com isso o petróleo aquece e os produtos resfriam. Uma vez aquecido, o petróleo passa pela dessalinização, onde é removida a água, os sais e as partículas sólidas em suspensão. Após a dessalinização o petróleo passa por um segundo pré-aquecimento com os produtos que deixam a unidade. Essa troca de calor tem como objetivo otimizar o sistema, diminuindo o lapso entre a temperatura inicial e ideal para o fracionamento do petróleo, que é realizada por meio de fornos tubulares. A temperatura máxima de aquecimento do petróleo é de 371 °C, acima dessa temperatura ocorre o craqueamento térmico e conseqüentemente a deposição do coque nos tubos dos fornos e regiões inferiores as torres, prejudicando a operacionalidade do sistema.

Ao sair dos fornos, grande parte do petróleo se encontra vaporizado. Na região de vaporização ou “zona de flash”, o petróleo que se encontra vaporizado sobe ao topo da torre e a parte líquida desce ao fundo. As torres possuem em seu interior bandejas que permitem a separação do petróleo pelos seus respectivos pontos de ebulição, uma vez que mais próximo ao topo, menor a temperatura de ebulição.

Ao término do processo de destilação atmosférica, o petróleo cru remanescente é bombeado aos fornos de seção de vácuo, onde será aquecido a temperatura máxima de 371 °C e será enviado a torre de destilação a vácuo, onde a pressão é próxima de 100mmhg. Da mesma forma que na destilação atmosférica, os hidrocarbonetos passam pelas bandejas de fracionamento, originando o gasóleo leve (GOL) e o gasóleo pesado (GOP). O resíduo do processo é uma borra de elevado peso molecular, com razoável concentração de impurezas que pode ser utilizado como óleo combustível e asfalto, conforme sua composição.

Ao passo que o gasóleo que seria utilizado como combustível é adicionado ao FCC (*Fluid Catalytic Cracking*) à alta temperatura e com presença de catalisadores fluidizados, ocorre a quebra das cadeias moleculares, originando uma nova mistura de hidrocarbonetos a ser fracionada. Os principais produtos obtidos neste processo são: Gás combustível, nafta, óleo leve, gás de refinaria, entre outros.

O processo em leito catalítico fluidizado FCC (*Fluid Catalytic Cracking*) tem um papel importante na indústria do refino de petróleo, principalmente em países, como o Brasil, que

têm que craquear petróleos pesados de cadeia longa. Os equipamentos básicos que compõem esse tipo de unidade são o reator, o *riser*, os ciclones e o regenerador, conforme mostrado na Figura 1.

O conjunto FCC pode ser dividido em três estágios: reação, separação e regeneração. No primeiro estágio o gasóleo é injetado no *riser*, onde a elevada temperatura e catalisadores fluidizados fazem com que as moléculas grandes dos hidrocarbonetos sejam quebradas em moléculas menores. Nesta etapa, o tempo de contato entre o catalisador com a carga é da ordem de 4 segundos no *riser* e alguns minutos no leito fluidizado. O catalisador utilizado neste processo é o zeólita Y. No segundo estágio, na etapa de separação, o catalisador é separado dos produtos do craqueamento por ciclones na saída do *riser*. Por fim, no terceiro estágio, o catalisador contendo na ordem de 2% de coque é enviado para o *stripper*, onde este catalisador é retificado com vapor e encaminhado para o regenerador que operam em temperaturas na ordem de 700 °C.

No regenerador, o coque do catalisador é queimado, e o enxofre e o nitrogênio do coque são transformados em SOx e NOx . O catalisador regenerado é transferido de volta para o reator, para iniciar novo ciclo de reação-retificação e depois ser novamente regenerado, passando por este ciclo centenas de vezes.

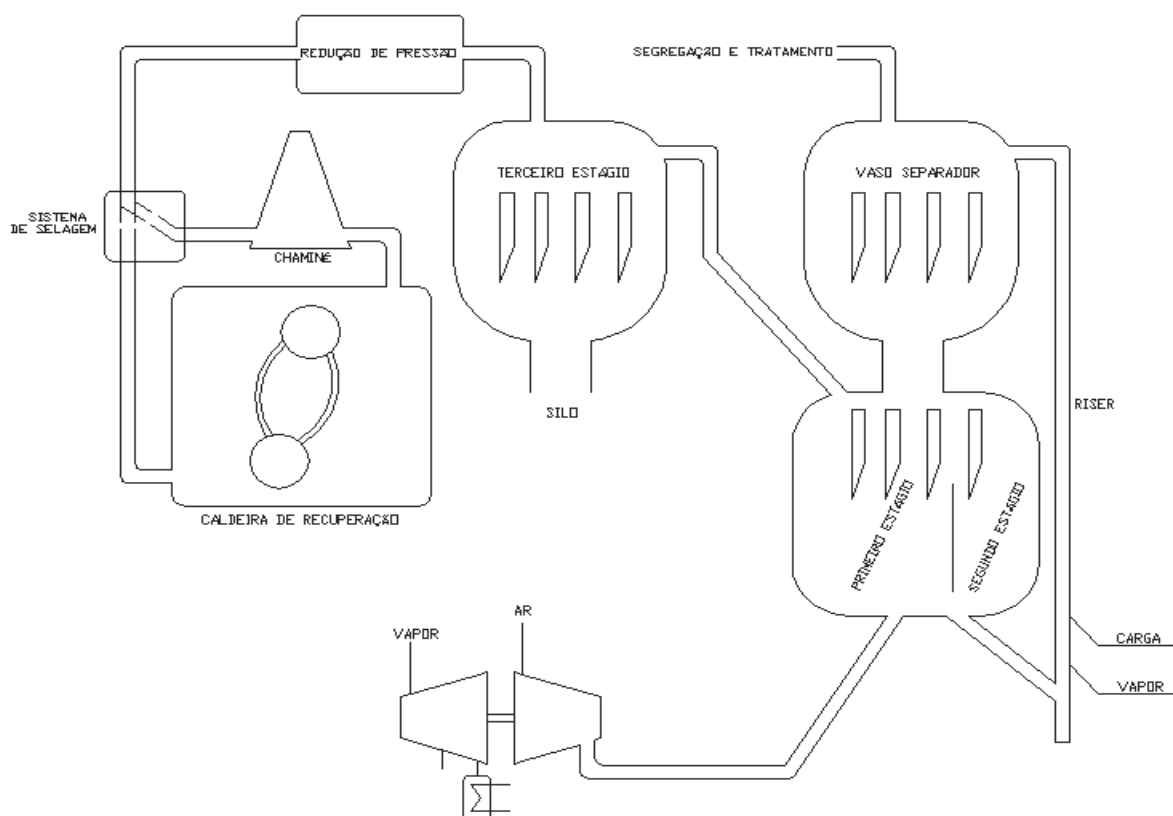


Figura 1 – Principais componentes no FCC

2 FUNCIONAMENTO DE UMA UNIDADE COM TURBOEXPANSOR

A instalação de um Turboexpansor em uma unidade já existente não muda o funcionamento da mesma. A unidade continua operando normalmente, como antes da instalação do tubo, porém o fluxo de gás de refinaria proveniente do FCC que antes da instalação do tubo passava pela *slide valve* e a Câmara de Orifício, com o intuito de reduzir a pressão antes de ir para caldeira, agora passará pelo Turboexpansor. O Turboexpansor, conseqüentemente, fará essa redução de pressão devido a expansão dos gases no interior do mesmo. Os gases ao entrarem no Turboexpansor são compelidos pela carcaça esférica (difusor), fazendo com que os gases sejam obrigados a passar por uma pequena região na extremidade, como a vazão e a pressão continuam a mesma, essa restrição de área faz com que haja força necessária para impulsionar as palhetas e, conseqüentemente acionar o gerador acoplado ao Turboexpansor, como ilustrado na Figura 2. Como a área interna da Turbina logo após o gás passar pelas palhetas aumenta consideravelmente, a pressão que estava na ordem de 3,5 kg/cm² passa a ser da ordem de 0,5 kg/cm². Ou seja, o diâmetro na admissão da turbina é de 1400 milímetros, enquanto que na exaustão é de 2260 milímetros. Nesse sistema existem cinco válvulas, sendo duas válvulas HV (fechamento lento), duas PDV (controle de fluxo) e uma XV (fechamento rápido).

Como o funcionamento da unidade nunca pode ser interrompido, a não ser nas paradas programadas, o sistema possui um *bypass* entre o FCC e a Câmara de Orifício. Caso haja algum problema com o Turboexpansor ou com os equipamentos relacionados ao Turboexpansor ou em caso de uma parada programada para manutenção, o fluxo de gás é redirecionado diretamente a Câmara de Orifício e, conseqüentemente para caldeira. As válvulas que administram a direção do fluxo são as PDV's, e elas trabalham simultaneamente, ou seja, quando uma esta aberta a outra, necessariamente precisa estar fechada.

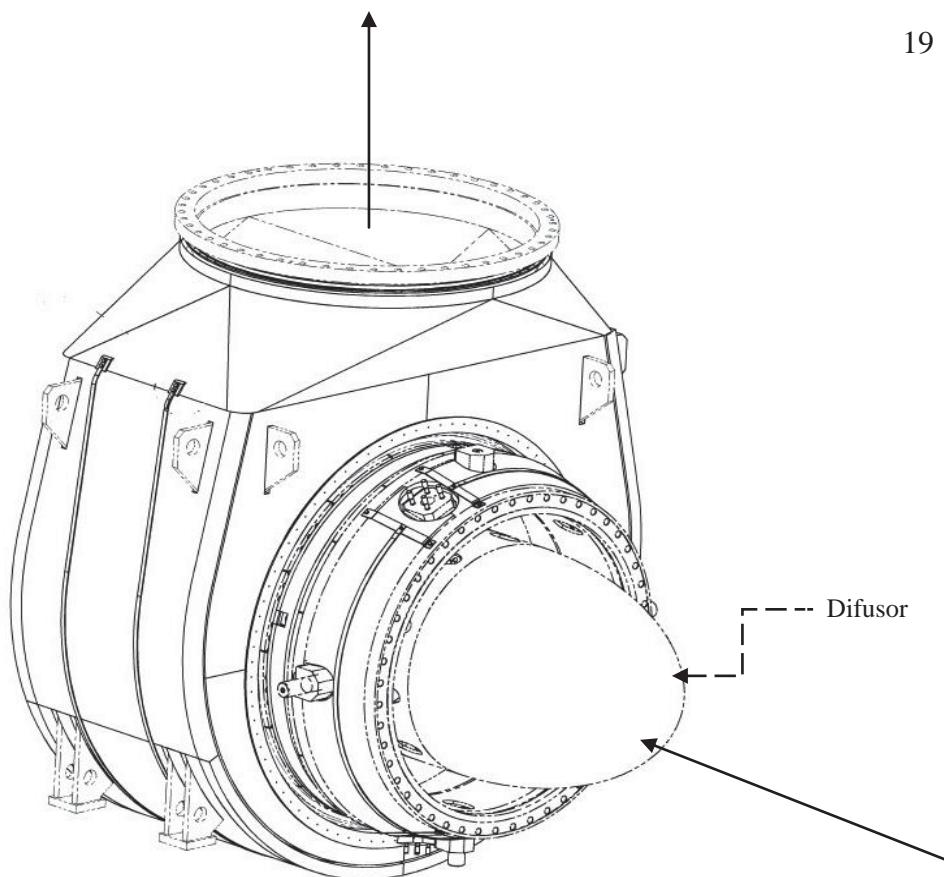


Figura 2 – Sentido do fluxo de gás no Turboexpansor (DRESSER RAND)

3 VANTAGENS NO INVESTIMENTO DESTA TECNOLOGIA

A Petrobras, nos últimos anos, vem investindo nesta tecnologia em suas refinarias devido ao fato que a carência de energia elétrica no Brasil nos últimos anos vem aumentando consideravelmente, principalmente devido ao crescimento econômico brasileiro já há alguns anos. Outro fato relevante é que essa energia vinha sendo desperdiçada na Câmara de Orifício e na *slide valve*, sem uma utilização no processo desse diferencial de pressão existente nesta unidade.

Em comparação com países europeus e os EUA, essa tecnologia já vem sendo utilizada a muitos anos, devido principalmente a escassez de fontes de energia elétrica nesses países.

Na questão ambiental, essa tecnologia é imbatível, já que o Turboexpansor, por meio de um gerador acoplado a ele, gerará em torno de 16 MW sem consumir nenhum tipo de combustível, sem gerar nenhum tipo de dano ao meio ambiente, seja ele por meio de ruído, poluição ou interferência no ecossistema, como por exemplo, no caso de uma hidroelétrica, aproveitando energia disponível e que hoje é jogado fora pela *slide valve* e Câmara de Orifício antes de ir para caldeira.

Porém, o custo ainda é alto desse investimento, já que os principais componentes ainda precisam ser importados. O fornecedor do Turboexpansor é a *Dresser-Rand*, o fornecedor do gerador é a *Brush*, o fornecedor das válvulas é a *Remosa*, o fornecedor do redutor de velocidade entre o turbo e o gerador é a *Flender*, as juntas de expansão é de fornecimento *Teadit* e o aço utilizado nos dutos é o aço inox 304H, material não fabricado no Brasil, tendo, portanto que importar todo o material necessário na construção desta unidade. Esta desvantagem pode, no futuro, ser transformada em uma vantagem, já que esses equipamentos poderão ser fabricado no país com o aumento da demanda por esses equipamentos no Brasil. A *Dresser-Rand* já anunciou grandes investimentos no Brasil devido a alta demanda que o país terá em equipamentos desse segmento com a exploração do pré-sal, e com as novas refinarias sendo construídas em território brasileiro.

Como a implantação de um Turboexpansor em uma refinaria demanda altos investimentos, o retorno financeiro destes investimentos, segundo minha estimativa, é de 7 anos. Este valor de 7 anos é estimado, já que o valor dos principais equipamentos, como por exemplo, o Turboexpansor, o gerador, as juntas de expansão, o redutor, as válvulas e os *skids* de óleo e vapor não tem seus dados abertos para a empresa Contratada neste caso.

Investimentos desta ordem só ocorrem quando existem políticas de geração de energia limpa e sustentável no país, busca pela auto-suficiência energética na unidade em questão, ou seja, a escassez de energia no país promove investimentos de geração e aproveitamento de energia e, por fim, diminuição da dependência de energia externa. O único dado que é possível ser estimado é o valor do contrato entre a Contratada e a Petrobras. Como o valor do contrato de prestação de serviço entre a Contratada e a Petrobras pode ser considerado em torno de 80 milhões de reais, o valor real não pode ser fornecido por questões contratuais, e considerando que os principais equipamentos foram adquiridos pelo mesmo valor, em torno de 80 milhões de reais, a implementação do Turboexpansor teve um investimento por parte da Petrobras de 160 milhões de reais. O custo do megawatt comercializado no Brasil é de aproximadamente R\$300/MWh (<http://agenciabrasil.ebc.com.br>), como o Turboexpansor, por meio do gerador acoplado a ele, gerará em média 14 MW, em um ano esta Turbina gerará 122304 MWh. Com isso, a receita anual gerada por este Turboexpansor, em milhões de reais, será de 36,69.

4 CONFIGURAÇÃO DA PLANTA

Como dito anteriormente no Capítulo 2, a configuração da planta antes da implantação do Turboexpansor, a que queda de pressão se dá na câmara de orifício e na *slide valve*, que pode ser visualizada na Figura 3.

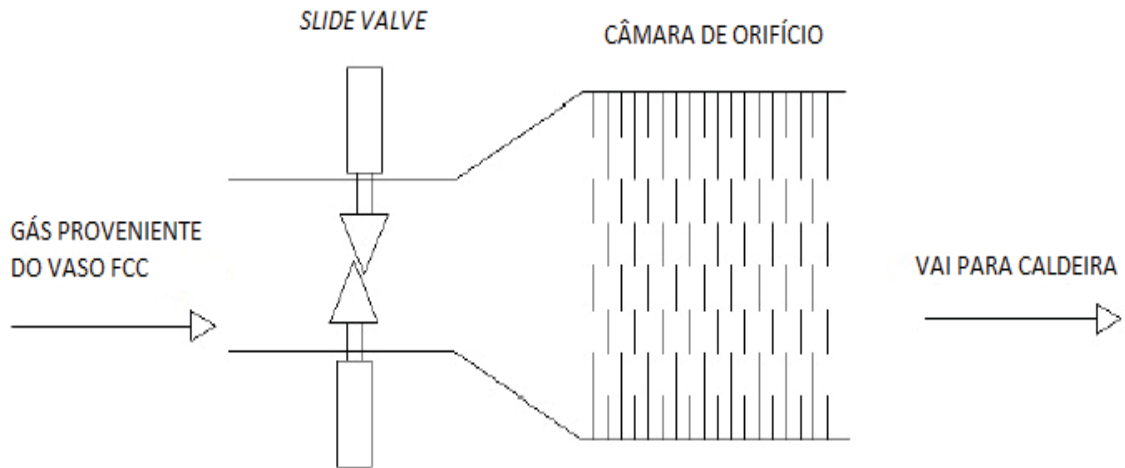


Figura 3 – Câmara de Orifício

Essa Câmara de Orifício é composta de diversos “pratos” em seu interior, que ao passo em que o gás passa de um para o outro a pressão diminui, até que se atinja a pressão requerida na caldeira. Outro ponto a se destacar nessa etapa é a *slide valve*. Com essa válvula em funcionamento, caso a pressão requerida pela caldeira não seja atingida somente com a atuação da Câmara de Orifício a *slide valve* entra em ação, impondo uma perda de carga a mais no gás, fazendo com que o mesmo atinja a pressão requerida na caldeira, que é em torno de 0,5 kg/cm².

Com a implantação do Turboexpansor, essa redução de pressão passa a acontecer no Turbo, como dito anteriormente. A maquete da planta com o Turboexpansor pode ser visualizada na Figura 4.

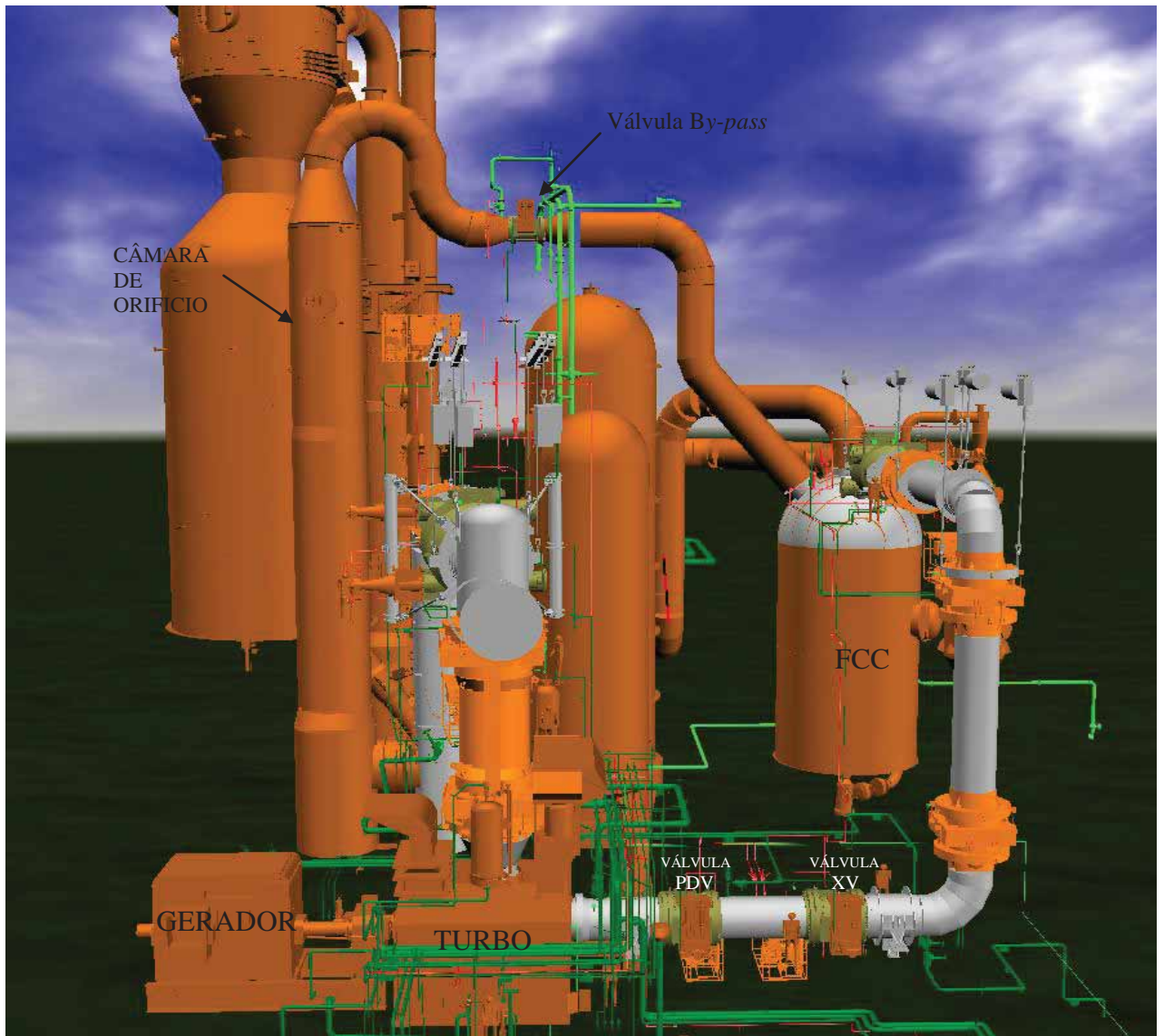


Figura 4 – Maquete da Unidade de FCC (POTENCIAL ENGENHARIA S.A)

Nesta maquete o Turboexpansor aparece enclausurado devido ao ruído produzido pela turbina. Porém, este enclausuramento se demonstra desnecessário, já que o ruído produzido pela unidade é bem superior ao ruído produzido pela Turbina. Como o enclausuramento faz parte do projeto, a REPLAN exigiu a montagem deste. Um futuro problema que a REPLAN terá devido essa decisão será nas manutenções, já que para realizar a manutenção do Turbo é necessário retirar o carretel que interliga os dutos da admissão ao Turboexpansor. Com o enclausuramento essa manobra se torna mais difícil, já que o projeto do enclausuramento não foi projetado para que em manutenções futuras o carretel seja removido com facilidade.

5 SISTEMAS MECÂNICOS DO TURBOEXPANSOR

Os sistemas mecânicos do Turboexpansor são compostos de diversos equipamentos, dentre eles válvulas, junta de expansão, sistemas de contra peso com mola e balança, e, por fim, o vaso de casca de noz. Para as válvulas serem acionadas é preciso ter um sistema hidráulico (atuadores) automatizado (*skid de óleo*).

5.1. Válvulas

Assim como dito anteriormente, a unidade é composta por cinco válvulas, cada uma delas com sua unidade hidráulica e seus atuadores. Os atuadores são os equipamentos responsáveis pelo movimento de abertura e fechamento dos discos das válvulas e as unidades hidráulicas são responsáveis pelo acionamento dos atuadores. São essas unidades hidráulicas que monitoram o funcionamento entre as válvulas PDV e a PDV *bypass* e o controle do acionamento das válvulas XV e HV. Uma diferença entre estas duas unidades hidráulicas é o modo de operação, já que o fechamento da válvula XV é da ordem de milésimos de segundos enquanto que o fechamento dos discos das válvulas HV leva em torno de dois minutos.

As válvulas HV (*Hand Valve*) são válvulas que tem como objetivo isolar o equipamento para manutenção. O procedimento de fechamento dessas válvulas se inicia quando a válvula XV (*shutdown valve*) estiver na posição fechada e a válvula PDV *bypass* (*Pressure Differential Valve*) estiver na posição aberta em regime de controle.

Com esses pré-procedimentos podemos dar continuidade ao processo de fechamento das válvulas. Como a válvula possui dois discos que permitem que o fluxo de gás seja interrompido, o disco “A” e o disco “B”. O primeiro disco a ser fechado é o disco “A”, e esta operação leva em torno de 2 minutos. Quando o disco “A” esta completamente fechado, não existindo mais o fluxo de gás, somente o mínimo de escape dos gases através da válvula. Esta Operação 1 pode ser visualizada na Figura 5.

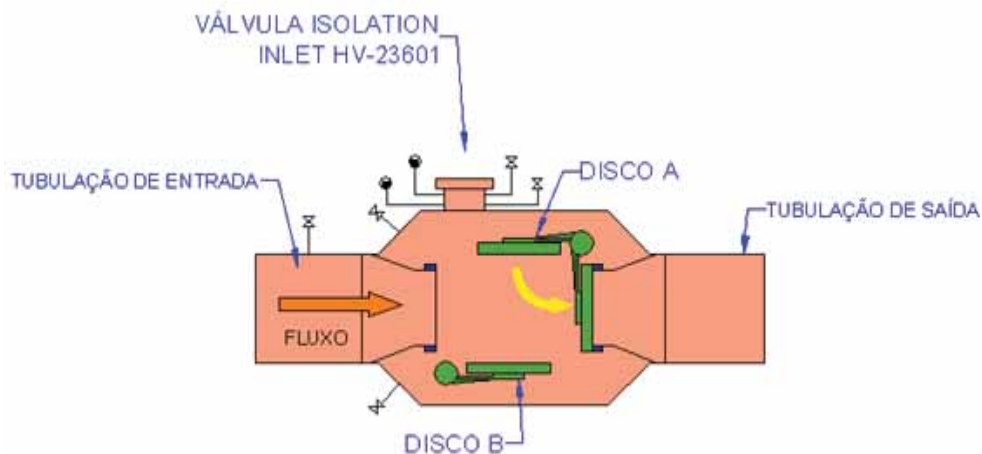


Figura 5 – Operação 1 (DRESSER RAND)

Quando o disco “A” estiver completamente fechado, a válvula de alívio deverá ser aberta na tubulação de saída e a pressão no disco “A” será a pressão ambiente. Então o disco “B” começa a fechar. Esta operação também leva em torno de 2 minutos e termina apenas quando o disco “B” estiver completamente fechado. Esta operação 2 pode ser visualizada na Figura 6.

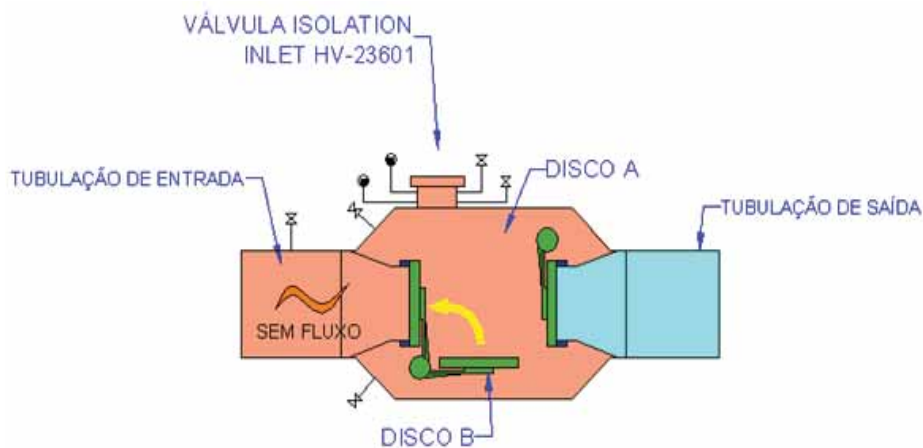


Figura 6 – operação 2 (DRESSER RAND)

Ao passo que ambos os discos estão fechados, é injetado gás inerte (nitrogênio) no interior da válvula com o objetivo de isolar completamente a tubulação de saída. Os requisitos para esta etapa são os seguintes: A pressão do gás inerte deve ser ajustada em $0,4 \text{ kg/cm}^2$ superior que a pressão de entrada e deverá ser mantida constante durante toda a operação em que o equipamento estiver em manutenção ou fora de serviço. A taxa de fluxo de gás inerte

adicionado deve suficiente para manter constante o nível de pressão dentro da válvula. Os flanges cegos (raquetes) devem ser fechados até que toda a operação no Turboexpansor seja finalizada. Esta operação 3 pode ser visualiza na Figura 7.

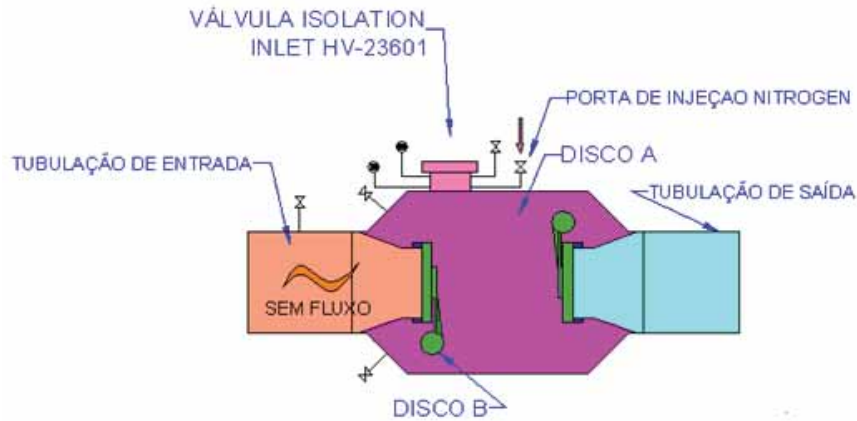


Figura 7 – operação 3 (DRESSER RAND)

Estas etapas servem tanto para a válvula HV na admissão quanto para a válvula HV de exaustão. Quanto aos procedimentos de abertura das válvulas são os seguintes: as válvulas PDV e XV devem estar na posição fechada enquanto que a válvula PDV *bypass* deve ser aberta em regime de controle. Remoção dos flanges cegos do Turboexpansor (raquetes) e, por fim, abrir os discos das válvulas HV. Com isso é descarregado o gás inerte presente no interior das válvulas HV pela válvula de alívio até que atinja a pressão ambiente. Esta operação (operação 4) pode ser visualizada na Figura 8.

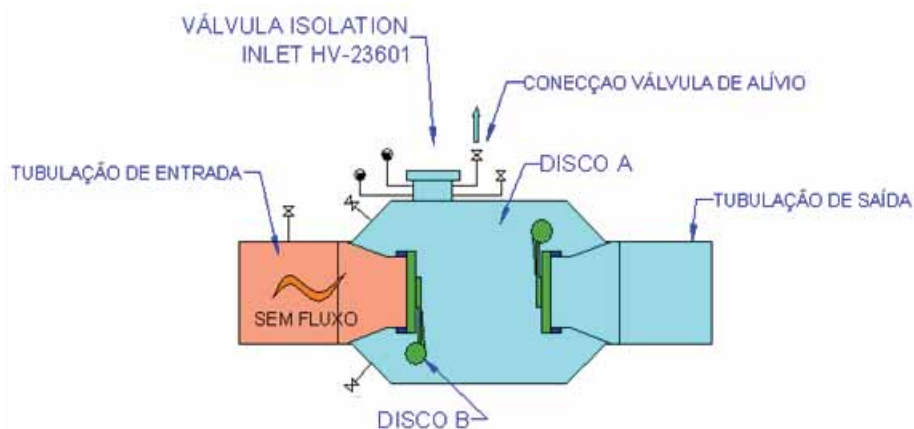


Figura 8 – Operação 4 (DRESSER RAND)

Com essa etapa finalizada, o disco “A” começa a abrir. Esta operação leva em torno de dois minutos e termina apenas quando o disco A está completamente aberto. Como o disco “B” continua fechado, ainda não existe fluxo de gás pelos dutos. Antes que o disco “B” seja aberto é verificado se todas as válvulas de alívio na tubulação estão fechadas e só então o disco “B” é aberto. Esta operação leva em torno de dois minutos. Porém, as válvulas XV e PDV devem estar na posição fechada e a válvula PDV *bypass* deve estar aberta em regime de controle. Somente então a válvula as XV é aberta e a PDV é aberta em regime de controle com a PDV *bypass*. Esta última operação (Operação 5) pode ser visualizada na Figura 9.

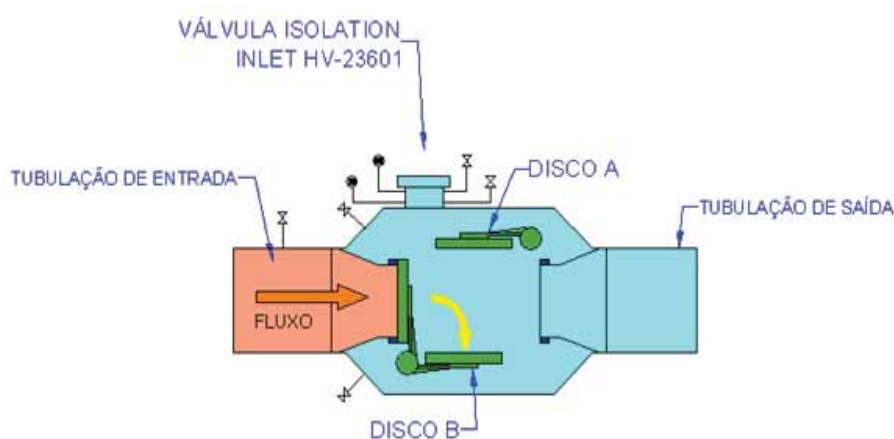


Figura 9 – Operação 5 (DRESSER RAND)

Outro tipo de válvula presente neste sistema é, a PDV e a PDV *bypass*, que consistem em válvulas tipo borboleta, que tem como objetivo monitorar e controlar o fluxo de gás entre a válvula PDV *bypass* e o Turboexpansor. Estas válvulas possuem um sistema de controle (unidade hidráulica) muito bem elaborado, que faz com que a vazão dos gases no Turboexpansor seja tal que a rotação do eixo se mantenha constante em 6200 rpm. Caso haja um aumento do fluxo de gás proveniente do FCC, as válvulas PDV regulam o fluxo no Turbo, fazendo com que uma maior quantidade de gás seja enviada a PDV *bypass* e, conseqüentemente mantenha constante a rotação na Turbina. Este modelo de válvula pode ser visualizado na Figura 10 e na Figura 11, que demonstra a válvula na posição totalmente aberta e na posição totalmente fechada, respectivamente.



Figura 10 – Válvula PDV com Atuador (<http://www.remosa-valves.com/photos/butterfly/13>)

A válvula XV também é do tipo borboleta, porém esta válvula atua com o objetivo de parada de emergência, ou seja, quando ocorre uma situação em que não é possível a solução imediata ou algum tipo de emergência em que a turbina precisa ser desligada imediatamente. Esta válvula é fechada em milésimos de segundos e, conseqüentemente, aciona a válvula PDV *bypass*, fazendo com que o fluxo dos gases seja transferido a Câmara de Orifício.

Caso um desses sistemas falhe, toda a unidade de craqueamento catalítico pára. Por isso, que antes da partida do Turboexpansor esses equipamentos são testados inúmeras vezes a fim de detectar irregularidades e corrigi-las antes da partida. Nesses testes de comissionamentos estarão presentes representantes da *Dresser-rand*, que são os responsáveis por todo sistema mecânico do Turboexpansor, pelas unidades hidráulicas e unidades de vapor relacionadas ao Turboexpansor. Os representantes da *Brush* são os responsáveis pela calibração dos sensores de vibração no eixo do gerador, pelo posicionamento magnético do eixo do gerador e pela calibração dos sensores de vibração no redutor. Os representantes da *Remosa* são os responsáveis pela automação entre os *skids* de óleo e os atuadores. E os representantes da *Flender*, são responsáveis pela verificação no nivelamento do redutor para garantir que o assentamento dos dentes entre o pinhão do Turboexpansor e a coroa do gerador não sofreu modificações durante a montagem do equipamento. Uma observação importante a ser mencionada é que o equipamento utilizado para fazer nivelamento das placas bases e o gerador foi o N3, um equipamento que fornece uma precisão de leitura de centésimos de

milímetros, com isso, qualquer erro no nivelamento na cota de altura das placas bases do gerador se torna improvável.

5.2. Juntas de expansão

O material utilizado na fabricação dos dutos é o aço inox 304H. Este material possui um alto coeficiente de dilatação térmica, cerca de 20% superior em relação ao aço carbono. Para absorver e reduzir os esforços sobre o Turboexpansor essas juntas são calculadas com referencia na temperatura de trabalho, no material dos dutos e conseqüentemente na quantidade necessária para absorção ou neutralização dos esforços causados pela dilatação térmica. O coeficiente de dilatação térmica do aço inox 304H é de 0,0179 [mm/°C m], ou seja, o duto dilata 0,0179 milímetros a cada grau Celsius e a cada metro. A temperatura de trabalho do Turboexpansor, ou seja, temperatura dos gases em questão, é de em torno 650 °C, podendo chegar até a temperatura de *trip*, em torno de 980 °C. Nesta situação de emergência os controladores desta unidade têm cinco minutos para checar o que esta ocorrendo e solucionar este problema, caso isso não ocorra a válvula XV é acionada, interrompendo o fluxo de gás pelo Turboexpansor e ao mesmo tempo acionando a válvula PDV *bypass*, fazendo com que o gás utilize a Câmara de Orifício.

Nesta unidade em questão existem dois modelos diferentes de junta de expansão, as juntas de absorção de dilatação térmica e as juntas articuláveis. As juntas articuláveis têm como principal objetivo neutralizar a dilatação térmica entre duas direções diferentes nos dutos, ou seja, em relação a dilatação entre os eixos X e Y é necessário utilizar uma junta articulável para que não haja uma eventual concentração de tensões em um dado ponto da tubulação. Com relação as juntas de absorção, elas têm como objetivo principal absorver a dilatação térmica referente aos dutos para que a carga sobre o Turboexpansor seja a mínima possível. Esta junta de absorção também pode ser fabricada acoplada a duas juntas articuláveis, realizando tanto a absorção quanto as articulações. Neste caso especial, a junta é utilizada em regiões críticas, onde a carga sobre o equipamento tem que ser a mínima possível.

No projeto em questão foi utilizado duas juntas articuláveis, duas de absorção de dilatação térmica e uma com ambas as funções, tanto absorção quanto dilatação. Esta junta com ambas as funções esta localizada na exaustão do Turboexpansor, logo após a Turbina. As juntas de absorção estão na direção norte positivo, ou seja, Z + e as juntas articuláveis estão na direção Y negativo. Um ponto a destacar é que todas as juntas possuem a mesma

nomenclatura, que é JE, o que difere entre elas são os códigos que estão em ordem crescente, iniciando em JE-22526 e terminando em JE-22530. Essa configuração das juntas pode ser visualizada na Figura 12, a seguir.

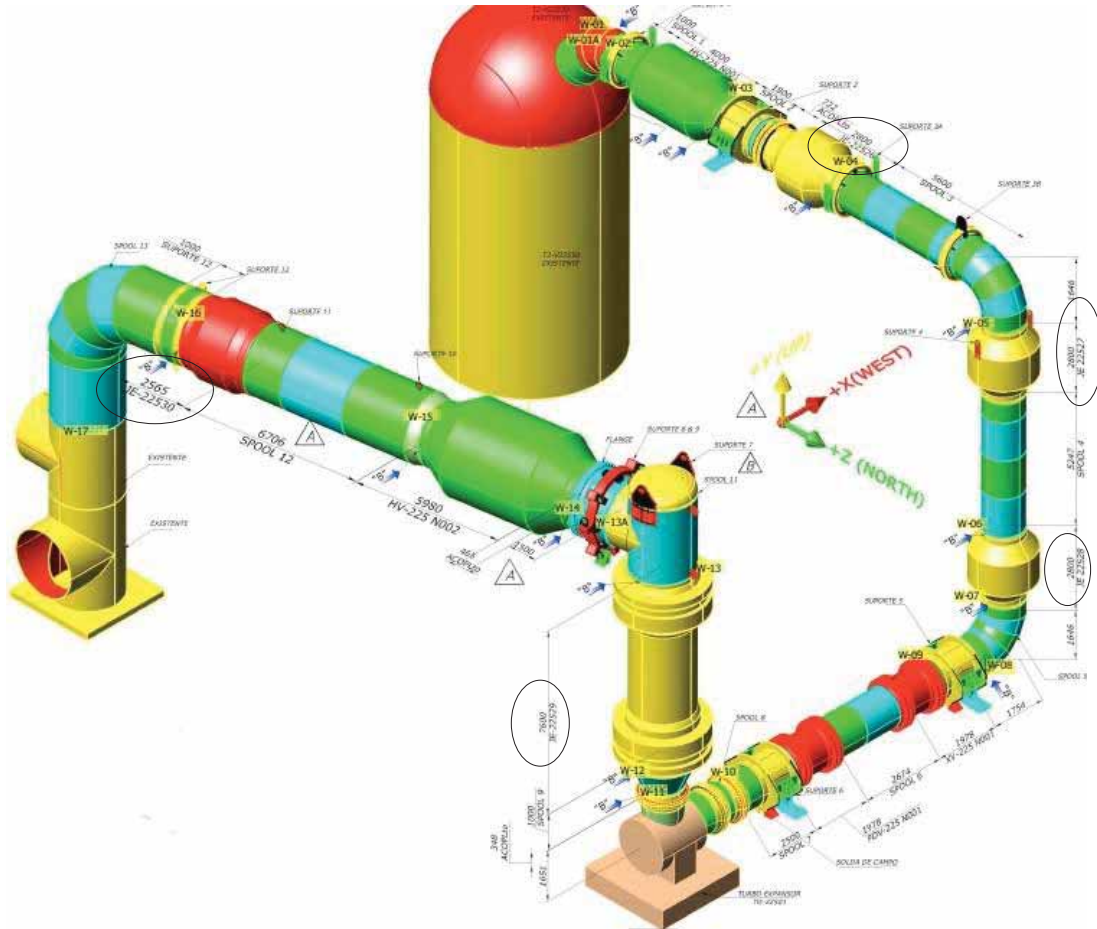


Figura 11 – Juntas de expansão (POTENCIAL ENGENHARIA S.A.)

5.3. Sistemas de contrapesos e molas

Assim como as juntas de absorção, os sistemas de contrapesos tem como finalidade absorver a maior quantidade dos esforços referente as dilatações térmicas dos dutos sobre o Turboexpansor, conforme visto na Figura 12. Esse sistema de absorção de energia é composto por um conjunto de contrapesos ligado a uma viga, atuando com o principio básico da balança. Com a dilatação térmica nos dutos, esse contrapeso atua absorvendo essa dilatação, evitando que esses esforços sejam transferidos a estrutura do Turboexpansor, já que esta não resistiria a essas tensões. A maior parte dos contrapesos está localizado na exaustão do Turboexpansor, já que todo o conjunto de dutos estão suspensos por sistemas de contrapesos. Os outros contrapesos estão alocados junto aos atuadores das válvulas PDV e da XV, já que o

modo de funcionamento dessas válvulas envolve grande quantidade de movimento e precisam ser absorvidas com um sistema de contrapesos.

No caso dos suportes de mola, seu princípio de funcionamento é neutralizar o peso dos dutos em regiões que essas cargas precisam ser neutralizadas. Esse suporte de mola não atua com absorvedor de dilatação térmica, e sim, somente como um equipamento que neutraliza grande quantidade de peso. Esse conjunto de suporte de mola é constituído pelas molas e pelos tirantes. Por se tratar de tirantes, esse sistema sempre trabalha tracionado.



Figura 12 – Maquete da Unidade FCC (POTENCIAL ENGENHARIA S.A.)

5.4. Vaso de casca de noz

Este sistema é de fundamental importância para o bom funcionamento e para que a eficiência do Turboexpansor se mantenha em patamares de projeto.

Como visto em capítulos anteriores, o Terceiro Estágio do FCC não possui um rendimento de 100%, ou seja, mesmo com todos os meios de retirar o catalisador já utilizado no processo um resquício desse catalisador ainda é encontrado nos gases que vão para a

Turbina. Esses catalisadores, ao entrar em contato com a região da palheta do Turboexpansor que é considerada como zona “morta”, ou seja, mesmo com a turbina em funcionamento essas partículas (catalisadores) ficam presas por diferencial de pressão entre o gás e a velocidade radial do rotor. Com isso, há uma diminuição no rendimento da turbina. Esse princípio também pode ser visualizado nos ventiladores, com a poeira que fica alocada na hélice do ventilador, mesmo que ele esteja em movimento.

Para solucionar esse problema foi adicionado a esse sistema do Turboexpansor um vaso que contém cascas de noz. Este material, importado por sinal, é lançado próximo ao rotor da Turbina, já que os gases estão por volta de 650 °C, e por abrasão esse catalisador é retirado das palhetas. A casca de noz, por se tratar de um material orgânico e utilizado em pequenas concentrações, não altera a composição do gás sendo consumida termicamente logo após retirar o catalisador.

Esse mecanismo é repetido sempre que o painel do Turboexpansor demonstrar essa queda de rendimento da máquina.

6 TURBOEXPANSOR EM QUESTÃO

O fornecedor do Turboexpansor em questão, como já dito anteriormente, foi a *Dresser-Rand*, uma das mais conhecidas e respeitadas fabricante desse equipamento.

O procedimento realizado pela *Dresser-Rand* na escolha do mais adequado Turboexpansor para a unidade de FCC, basicamente é realizada em um gráfico que relaciona a taxa de pressão (montante/jusante) e vazão dos gases, conforme Figura 14.

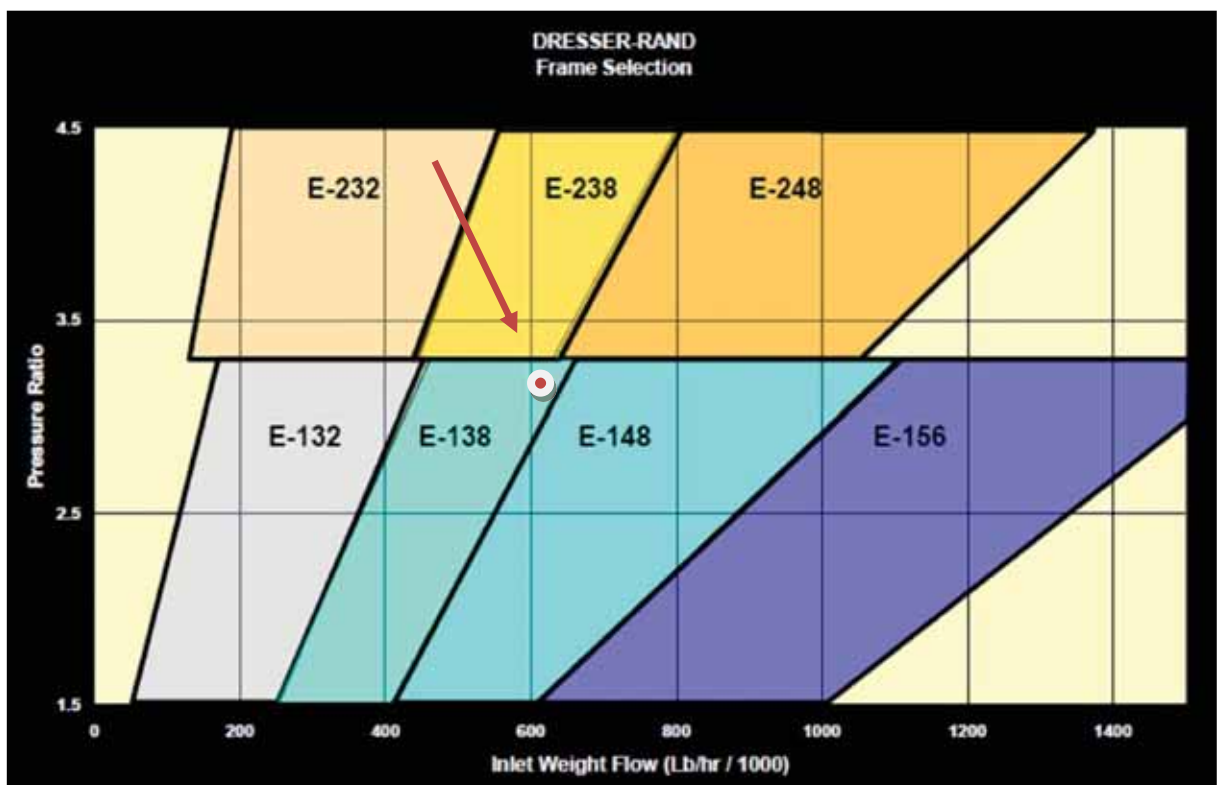


Figura 13 - Gráfico de seleção de Turboexpansore *Dresser-Rand* (EXPANDERS DRESSER)

Com os valores das variáveis, segundo Rudson Haber Canuto, nas condições normais de operação, pode-se obter a taxa de pressão e a vazão dos gases da máquina. Esta tabela pode ser visualizada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Variáveis do processo de redução de pressão em condições normais de operação

Vazão do ar [ton/h]	Temperatura ambiente [°C]	Pressão a montante [kgf/cm ²]	Temperatura a montante [°C]	Pressão a jusante [kgf/cm ²]	Temperatura a jusante [°C]
246	25,0	3,5	670	0,5	550

Por motivos de segurança de informação, os valores expostos na Tabela 1 são aproximados, tendo apenas o objetivo de ilustrar a ordem de grandeza das variáveis.

Por meio dos valores aproximados da Tabela 1 é possível calcular a taxa de pressão e a vazão dos gases, como mostram os cálculos a seguir:

$$PR = \frac{P_{ent} + P_{atm}}{P_{sai} + P_{atm}} = \frac{3,5 + 1,01}{0,5 + 1,01} = 2,98$$

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{ar} \times A = 246 \times 1,125 = 276 \text{ ton/h}$$

$$\dot{m}_{total} = \frac{276 \times 2204,62}{1000} = 608 \text{ lb/h} \times 1000$$

Onde:

PR: Pressure Ratio;

P_{ent} : Pressão de entrada na *slide valve*, ou de saída do Terceiro Estágio;

P_{sai} : Pressão de saída da Câmara de Orifício, ou pressão a jusante do turboexpansor;

P_{atm} : Pressão atmosférica;

\dot{m}_{total} : Vazão mássica dos gases oriundo do Terceiro Estágio;

\dot{m}_{ar} : Vazão mássica de ar oriunda dos sopradores de regeneração;

A: Constante de 12,5% da vazão de ar composta basicamente de vapor de água que é injetado no Conjunto Conversor na fluidização da carga.

Basta cruzar os resultados encontrados de 608 lb/(h x 1000) no eixo das abscissas com 2,98 no eixo das ordenadas da Figura 14 (marcado com ponto vermelho) para ter uma idéia do Turboexpansor mais adequado ao processo, que neste caso é o E-138.

Alguns dados do equipamento fornecidos a REPLAN foram:

Fabricante: *Dresser-Rand*;

Disposição: *Axil-Top*;

Modelo: E-138.

Onde:

- E = *Expander*;
- 1 = Um Estágio;
- 38 = Diâmetro do disco de fixação das palhetas em polegadas.

Rotação: 6200 rpm.

Trata-se de uma máquina com disposição Axial-Top, já que os gases são admitidos axialmente e expelidos verticalmente.

Apesar da Figura 13 dar o direcionamento inicial da máquina mais adequada ao processo, a *Dresser-Rand* projeta a máquina especialmente para a planta petrolífera em questão, já que cada unidade tem suas particularidades e, portanto, é um projeto único.

A *Dresser-Rand* pode coletar dados necessários ao projeto do Turboexpansor quando a planta de FCC já esta em operação ou ainda, participar desde o projeto básico de uma planta de FCC para viabilizar melhorias no fornecimento e implementação da máquina.

7 GERADOR E REDUTOR DE VELOCIDADE

Como o Turboexpansor é um equipamento que transforma a energia contida nos gases em energia mecânica, por si só o Turboexpansor não é capaz de gerar energia elétrica. Esse equipamento necessita de um gerador elétrico acoplado a ele para que transforme essa energia mecânica em energia elétrica. Porém, como a velocidade angular do eixo do Turboexpansor é de 6200 rpm (ver no Capítulo 5) este necessita de um redutor de velocidade para que reduza a energia cinética entre os eixos dos equipamentos. Como o sistema elétrico no Brasil é de 60 Hz, a rotação necessária no gerador é de 1800 rpm, já que este equipamento é de 2 pares de pólos.

O Redutor de Velocidade é um sistema mecânico, composto por um par de engrenagens (coroa e pinhão). Este equipamento fica dentro de uma caixa onde o óleo é injetado nas partes em que ocorre maior atrito, para que haja o resfriamento e a lubrificação das engrenagens. Este óleo é circulado até os trocadores de calor para que ele seja resfriado e retorne ao redutor, mantendo, portanto sempre o mesmo nível de óleo na caixa de engrenagem. O modelo de engrenagem utilizado neste projeto é a helicoidal “espinha de peixe”, já que este modelo de engrenagem permite uma transmissão silenciosa, não oferece risco de vibração e choques, pois há sempre dois ou três dentes em contato e a relação de transmissão é maior em comparação com as engrenagens de dentes retos. Uma observação importante em relação a este tipo de engrenagem é que como os dentes são helicoidais, conseqüentemente é produzido forças axiais que são suportadas pelos mancais de escora. Porém, quando se utiliza esse modelo de Redutor de Velocidade com dupla engrenagem as forças axiais praticamente se anulam no interior do Redutor de Velocidade.

Com relação ao Gerador, como o mancal utilizado nesse equipamento é o de deslizamento, o eixo necessita de um *Jack oil*, sistema pelo qual é responsável pelo fornecimento de pressão hidráulica no mancal do Gerador capaz de movimentar o eixo até que ele fique na região central do mancal. Este procedimento é necessário ser realizado antes do acionamento do eixo, para evitar o desgaste entre o eixo e o mancal, por atrito. Com o gerador já em operação, esse sistema com *Jack oil* é retirado de funcionamento, já que o filme de óleo entre o mancal e o eixo já está presente. Porém, quando a velocidade angular do eixo é reduzida consideravelmente até o ponto em que o filme de óleo deixe de existir, o sistema *Jack oil* entra em funcionamento novamente.

A energia é gerada em 13,8 KV e é conduzida até a central elétrica da Refinaria para a partir daí é distribuída pela planta.

8 CÁLCULOS

Com a implementação do Turboexpansor, as temperaturas a montante e a jusante do turbo são, respectivamente, 670 °C e 550 °C (T_{ent} e T_{sai}). Notamos também, que a temperatura a jusante é bem inferior que a temperatura a montante e a entalpia na saída da máquina esta diretamente relacionada com a temperatura, sendo, para o Turboexpansor, quanto maior esse diferencial melhor. Por outro lado, essa temperatura mais baixa dos gases que entram na caldeira, torna-se necessário a queima suplementar.

Sabendo que o trabalho que o Turboexpansor pode disponibilizar é:

$$W = \dot{m}_{total} \times \Delta h_{total} \text{ [kW]} \quad (1)$$

Onde:

W é o trabalho fornecido pelo Turboexpansor;

\dot{m}_{total} é a massa total de gases que passa pelo Turboexpansor;

Δh_{total} é a variação de entalpia entre entrada e saída do Turboexpansor.

A massa total que passa pelo Turboexpansor é de 276 ton/h (ver no capítulo 5), resta saber a variação entalpia para se ter o resultado final.

Considerando o gás que flui no Turboexpansor como sendo gás perfeito, e sabendo que:

$$C_{p0} = f(T) \quad (2)$$

Onde:

C_{p0} é o calor específico a pressão constante e nula;

$f(T)$ é uma função apenas da temperatura.

Sabendo ainda que;

$$h_T = \int_{T_0}^T [C_{p0} dT \left[\frac{kJ}{Kg} \right]] \quad (3)$$

Onde:

h_T é a entalpia a uma dada temperatura;

T é uma temperatura;

T_0 é a temperatura de referência (298 K).

Para encontrar a entalpia do gás a uma dada temperatura necessitamos de conhecer o C_{p0} e a temperatura que o gás se encontra, sendo que a temperatura foi visto no início deste Capítulo.

O C_{p0} deve ser encontrado para cada substância que compõe o gás. A composição do gás, efetuada na própria Petrobras, esta representada na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Composição do gás que flui para o Turboexpansor (Petrobras)

<i>Componente</i>	<i>% mol</i>
O ₂	0,43
N ₂	68,38
H ₂ O	14,01
CO	5,69
CO ₂	11,38
SO ₂	0,11

De acordo com WYLEN, G. J. V., o C_{p0} pode ser obtido a partir da equação:

$$C_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3 \left[\frac{kJ}{KgK} \right] \quad (4)$$

Onde:

C_0 , C_1 , C_2 e C_3 são valores constantes e tabelados; e

$$\theta = \frac{T_{méd}}{1000} [K] \quad (5)$$

Onde:

$T_{méd}$ é o valor médio de temperatura entre entrada e saída do Turboexpansor.

A Tabela 3 nos possibilita visualizar os valores das constantes envolvidas na equação (4):

Tabela 3 – Constantes para cada substância do gás (WYLEN, G. J. V.).

<i>Componente</i>	C_0	C_1	C_2	C_3
O ₂	0,88	-0,0001	0,54	-0,33
N ₂	1,11	-0,48	0,96	-0,42
H ₂ O	1,79	0,107	0,586	-0,2
CO	1,1	-0,46	1	-0,454
CO ₂	0,45	1,67	-1,27	0,39
SO ₂	0,37	1,05	-0,77	0,21

Para se aplicar a equação (4) necessita-se obter $T_{méd}$, assim:

$$T_{méd} = \frac{T_{ent} + T_{sai}}{2} \quad [\text{K}] \quad (6)$$

Tabela 4 – Dados para cálculo de $T_{méd}$

	[°C]	[K]
T_{ent}	670	947,15
T_{sai}	550	823,15

Com os dados da Tabela 4 e aplicando a equação (6), tem-se que:

$$T_{méd} = \frac{947,15 + 823,15}{2} = 885,15$$

Dessa forma, aplicando na equação (5), tem-se:

$$\theta = \frac{885,15}{1000} = 0,88515 \text{ K}$$

Agora sim pode-se aplicar a equação (4) e encontrar o valor de C_{p0} para cada substância individualmente. A aplicação resulta no conteúdo da Tabela 5.

Tabela 5 - C_{p0} de cada substância que compõe o gás

Componente	C₀	C₁	C₂	C₃	C_{p0} [kJ/KgK]
O ₂	0,88	-0,0001	0,54	-0,33	1,068039017
N ₂	1,11	-0,48	0,96	-0,42	1,138427583
H ₂ O	1,79	0,107	0,586	-0,2	2,183620303
CO	1,1	-0,46	1	-0,454	1,153491929
CO ₂	0,45	1,67	-1,27	0,39	1.192553452
SO ₂	0,37	1,05	-0,77	0,21	0,84175619

Sabendo que:

$$h_{ent} - h_{sai} = \int_{T_0}^{T_{ent}} C_{p0} dT - \int_{T_0}^{T_{sai}} C_{p0} dT = \int_{T_{sai}}^{T_{ent}} C_{p0} dT \quad [kJ/Kg] \quad (7)$$

Onde:

h_{ent} é a entalpia na entrada do Turboexpansor;

h_{sai} é a entalpia na saída do Turboexpansor.

Considerando o calor específico médio constante no processo, conclui-se que:

$$\Delta h = h_{ent} - h_{sai} = C_{p0} (T_{ent} - T_{sai}) \quad [kJ/Kg] \quad (8)$$

Com os dados de C_{p0} da Tabela (5) e temperatura da Tabela 4, pode-se aplicar a equação (8) e encontrar o Δh para cada substância do gás como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Variação entálpica (Δh) de cada substância do gás.

Componente	C_{p0}[KJ/KgK]	Δh[Kj/Kg]
O ₂	1,068039017	149,5254624
N ₂	1,138427583	159,3798616
H ₂ O	2,183620303	305,7068424
CO	1,153491929	161,4888701
CO ₂	1.192553452	166,9574833
SO ₂	0,84175619	101,0107428

Para se verificar qual contribuição de energia que cada substância do gás entrega ao Turboexpansor, é necessário ponderar os valores de variação entálpica com a composição do gás, sendo o resultado exposto na Tabela 7.

Tabela 7 – Ponderação da variação entálpica e a composição do gás.

<i>Componente</i>	<i>x</i>	Δh [Kj/Kg]	<i>x.Δh</i>
O ₂	0,0043	149,5254624	0,64295949
N ₂	0,6838	159,3798616	108,98394936
H ₂ O	0,1401	305,7068424	42,82952862
CO	0,0569	161,4888701	9,18871671
CO ₂	0,1138	166,9574833	18,99976160
SO ₂	0,0011	101,0107428	0,11111181

Para se obter o Δh_{total} e aplicar o mesmo na equação (1) temos que efetuar o somatório da quarta coluna da Tabela 7 ($x.\Delta h$). Dessa forma tem-se:

$$\Delta h_{total} = \sum (x.\Delta h) = 180,756085 \text{ [kJ/Kg]}$$

Finalmente, para se ter o trabalho que o Turboexpansor pode fornecer (desconsiderando as perdas), pode-se aplicar a equação (1) efetuando os devidos ajustes de unidades.

$$W = \dot{m}_{total} \times \Delta h_{total} = 276 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \cdot 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{ton}} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} \cdot 182,080491 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$W = 13857,97 \text{ KW}$

9 COMISSIONAMENTO, CONDICIONAMENTO E PRESERVAÇÃO

O setor de Comissionamento da obra consiste nas etapas de preservação, condicionamento e o próprio comissionamento.

Começando pela preservação, esta atividade tem como objetivo manter os equipamentos em boas condições de operação, recebimento dos equipamentos e armazenamentos dos principais equipamentos da obra. Neste caso em especial, os principais equipamentos referente à obra já havia sido comprado anteriormente pela Petrobras, como por exemplo, o Turboexpansor, as Juntas de Expansão, o Gerador, as Unidades Hidráulicas, os Atuadores, entre outros equipamentos. Porém, esta etapa começou a ser realizada no início de 2010, quando se iniciou o Contrato de prestação de serviço entre a Contratada e a Petrobras, mas esses equipamentos foram adquiridos no início de 2009. Neste período, esses equipamentos não tiveram atividades de preservação realizada pela Petrobras. Contudo, esses equipamentos não sofreram grandes avarias nesse período capazes de prejudicar as condições de operação do sistema.

Com relação as atividades de condicionamento, foram realizados a decapagem química e o *flushing* oleohidráulico.

A decapagem química é um processo pelo qual se utilizam substâncias químicas, como por exemplo, ácido cítrico, barrilha leve e nitrito de sódio, com o objetivo de retirar as partículas (carepas) em regiões internas da tubulação.

O *flushing* oleohidráulico é um processo em que o fluido lubrificante (óleo), circula pela tubulação com o objetivo de retirar as partículas remanescentes da decapagem química. Este procedimento consiste em filtrar esse óleo até que atinja a quantidade mínima de impurezas registradas nas telas que filtra esse fluido. Essa quantidade mínima é estabelecida em normas, como por exemplo, a ISO 4406 referente à contagem de partículas no óleo. Uma observação importante a ser feita é referente ao tipo de óleo utilizado no flushing, este tipo óleo é o mesmo utilizado no equipamento em funcionamento, e como ele passou por diversas telas de filtragem e ao final do flushing este óleo estará mais limpo do que o óleo comprado dos revendedores, porém não é garantido que esse óleo seja utilizado no equipamento em funcionamento, já que esta decisão será dos técnicos da *Dresser-Rand*. Em caso de descarte desse óleo, ele será realizado em um local apropriado e será utilizado um óleo nas mesmas especificações e adquirido no mercado local, já que se trata de um tipo de óleo de fácil acesso.

Com essas etapas prontas inicia-se o processo de comissionamento, que são os testes pré-operação dos equipamentos. Esta etapa é realizada pela empresa Contratada, juntamente com os fornecedores dos equipamentos e a própria Petrobras. Os principais procedimentos referentes ao comissionamento das válvulas foram explanados no Capítulo 5. Porém, este não é o único procedimento de comissionamento antes da partida do Turboexpansor, tendo que comissionar também as linhas elétricas, equipamentos eletrônicos da subestação elétrica e do sistema de automação entre o Turboexpansor, Gerador e as Válvulas. Após essa etapa de comissionamento, há a liberação para partida da máquina. Começa então a circulação do gás de refinaria pelos dutos e pelo Turboexpansor. Esta etapa ocorre de maneira lenta e gradual, com a abertura da válvula PDV e o fechamento da PDV *bypass*, para que a dilatação térmica proveniente da alta temperatura dos gases ocorra lentamente, sem que haja dilatações térmicas bruscas no material do Turboexpansor.

10 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

A previsão de geração de energia elétrica do Turboexpansor para esta unidade está entre 13 à 16 MW, dependendo das condições de operação do FCC, já que a principal unidade dentro de uma refinaria é o FCC. Com isso, esta unidade é que fornece as condições de operação de diversas outras unidades inclusive a do Turboexpansor.

Outro ponto importante a destacar nas condições de operação do Turboexpansor são as cargas sobre a estrutura do Turboexpansor quando este se encontra em funcionamento, mesmo com todos os equipamentos para minimizar as cargas sobre a Turbina ainda assim a máquina é projetada para suportar uma quantidade de carga sobre sua estrutura. Com relação a estrutura da máquina na admissão, esta é projetada para suportar até 3000 kgf, já que na admissão o duto tem 1400 milímetros de diâmetro com uma espessura da estrutura do Turboexpansor de 25,4 milímetros. A pressão nesse local é de 3,5 kgf/cm². Outro ponto importante a destacar sobre a elevada carga suportada nessa região do Turboexpansor é devido aos pinos de fixação estar próximos ao duto, como pode ser visualizado na Figura 14. Com relação a exaustão, a carga suportada nessa região é de aproximadamente 1700 kgf, já que a espessura da estrutura do Turboexpansor nesta região é de 19 milímetros e com diâmetro de 2260 milímetros com pressão de trabalho da ordem de 0,5 kgf/cm². Devido a esta fragilidade na região da exaustão do Turboexpansor que se encontram duas balanças e uma junta de expansão, para evitar que esforços atinjam o Turboexpansor.

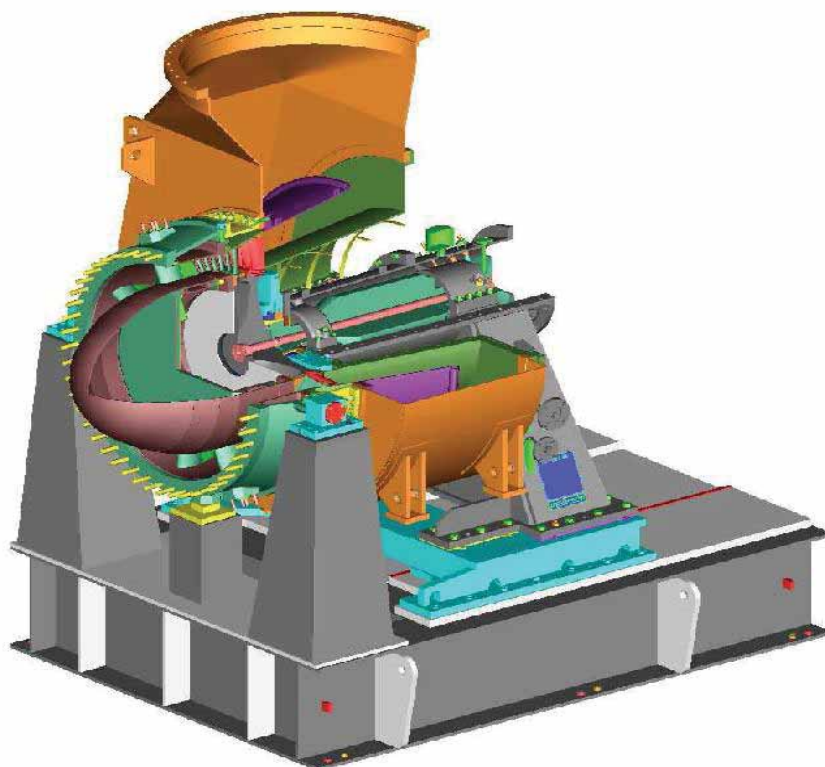


Figura 14 – Representação do Turboexpansor (DRESSER RAND)

Como o Turboexpansor ainda não está em operação, não tem como prever as reais condições de operação da máquina. Porém, com o projeto fornecido pela *Dresser-Rand* e com os dados do sistema fornecido pela Petrobras pode-se prever e evitar futuros problemas envolvendo os principais equipamentos desta unidade, mas não pode evitar todos eles. Como, por exemplo, na implementação do Turboexpansor na refinaria Henrique Laje (REVAP), tiveram alguns problemas em relação a *slide valve* da unidade, e conseqüentemente, alterando de maneira significativa o rendimento da máquina.

11 CONCLUSÕES, SUGESTÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Como visto neste trabalho, a implementação de um Turboexpansor em uma refinaria é totalmente viável e sustentável, já que o Turboexpansor não necessita de nenhum tipo de combustível adicional para produzir potência de eixo e, conseqüentemente, não gera nenhum tipo de emissão de poluentes ao meio ambiente, e nem algum outro tipo de dano, como por exemplo, ruído, desmatamento, resquício de material inorgânico, entre outros.

Outro ponto a destacar sobre essa tecnologia é o aproveitamento da energia que estava sendo dissipada na *slide valve* e na Câmara de Orifício, energia pela qual é desperdiçada pela refinaria deste que a unidade de Craqueamento Catalítico (FCC) entrou em operação, para gerar trabalho e, conseqüentemente permitir que a Refinaria se torne cada vez mais auto-suficiente de energia elétrica externa, que neste caso se trata da concessionária CPFL.

Com relação ao custo do empreendimento, como visto na Capítulo 4 deste trabalho, mesmo sendo uma tecnologia com alto valor agregado, este tipo de Turbina vem sendo implementado pela Petrobras nos últimos anos devido ao fato de ser uma tecnologia sustentável, que aproveita a energia residual que vem sendo desperdiçada a anos pelas refinarias, com o objetivo de diminuir a dependência de energia elétrica do sistema integrado nacional, tornando-se cada vez mais auto-suficiente. Com isso, a imagem pública da empresa se torna cada vez mais sustentável perante o mercado mundial, já que a Petrobras quer ser reconhecida como uma empresa de energia cada vez mais sustentável.

Uma sugestão para futuros trabalhos seria analisar e comparar o funcionamento dos dois últimos Turboexpansores implementado pela Petrobras no Brasil, na Refinaria Henrique Laje (REVAP) e na REPLAN, com o objetivo comparar o funcionamento e o rendimento das Turbinas para analisar uma eventual melhoria no processo, já que as duas Turbinas são do mesmo fabricante e foram adquiridas em um curto espaço de tempo uma da outra pela Petrobras.

Outro ponto importante observado durante o acompanhamento da implementação deste Turboexpansor foi referente aos testes de flexibilidade realizado, com objetivo de analisar tensões quando o Turboexpansor estiver em operação. O que foi observado durante os testes é que a tensão medida, por meio de um dinamômetro, foi muito superior a tensão admitida pela estrutura do Turboexpansor, já que esta estrutura admite por volta de 3000 kgf enquanto que o medido no teste foi superior a 5000 kgf. O motivo por essa diferença foi constatado pelos técnicos da Petrobras juntamente com os responsáveis pela montagem eletromecânica por

parte da Potencial Engenharia e foi devido as tubulações que envolvem os sistemas auxiliares do Turboexpansor estarem conectadas de maneira direta nos dutos de admissão, sem a utilização de mangueiras flexíveis. Com isso, uma sugestão para futuros trabalhos seria um estudo antecipado dessas tubulações, analisando onde devem ser utilizadas mangueiras flexíveis e onde a tubulação pode ser conectada de maneira direta nos dutos do Turboexpansor sem que existam tensões que prejudiquem o funcionamento do Turboexpansor.

Pode-se dizer que este trabalho de graduação alcançou os objetivos esperados, já que foram apresentados diversos conhecimentos que não são vistos na Graduação, podendo no futuro ser uma referência bibliográfica para outro aluno, ou até mesmo, ser uma bibliografia para alunos da graduação que se interessar em conhecer melhor sobre esta tecnologia.

REFERÊNCIAS

EXPANDERS DRESSER. **FCC Power Recovery Expanders**. 2011. Disponível em: <http://www.dresser-rand.com/literature/turbo/85211_FCCExpanders.pdf>. Acesso em 15. Set 2011.

GANTRA, A. **Custo da energia para indústria no Brasil é 50% mais que em outros países, mostra estudo da Firjan**. Empresa Brasil de Comunicação. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2011-08-10/custo-da-energia-para-industria-no-brasil-e-50-mais-alto-que-em-outros-paises-mostra-estudo-da-firjan>>. Acesso em: 28. Nov 2011.

REMOSA. **Remosa's Production**. 2011. Disponível em: <<http://www.remosa-valves.com/photos/butterfly/13>>. Acesso em 04. Dez 2011.

WYLEN, G. J. V.; SONNTANG, R. E.; BORGNAKKE, C.. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 577p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CANUTO, R. H.. **Aproveitamento de energia com implementação de um Turboexpansor instalado na Refinaria Henrique Laje da Petrobras.** 2010. 50 f. Dissertação (Trabalho de Graduação) – Faculdade Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

DRESSER-RAND. **Expander Manual**, Fornecimento Dresser-Rand à Refinária do Planalto Paulista. 2009.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008. 643p.

POTENCIAL ENGENHARIA S.A. **Maquete Eletrônica da Unidade FCC**, Fornecimento Potencial Engenharia S.A. à Refinaria do Planalto Paulista. 2010.

WYLEN, G. J. V.; SONNTANG, R. E.; BORGNAKKE, C.. **Fundamentos da Termodinâmica.** 6ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 577p.