

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA/ CEFET/RJ**

**ANÁLISE DE REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA EM UMA UNIDADE DE
REMOÇÃO DE GÁS CARBÔNICO DO ETANO**

Maurício Milbratz
Vinícius Macedo

Prof. Orientador:

Alexandre Silva de Lima

**Rio de Janeiro
Junho de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA/ CEFET/RJ**

**ANÁLISE DE REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA EM UMA UNIDADE DE
REMOÇÃO DE GÁS CARBÔNICO DO ETANO**

Maurício Milbratz
Vinícius Macedo

Projeto final apresentado em cumprimento
às normas do Departamento de
Educação Superior do CEFET/RJ, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador:

Alexandre Silva de Lima

**Rio de Janeiro
Junho 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

- M638 Milbratz, Maurício
Análise de reaproveitamento de energia em uma unidade de remoção de gás carbônico do etano / Maurício Milbratz, Vinícius Macedo.—2018.
53f. + anexos : il. (algumas color.) , graf. , tabs. ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 52-53
Orientador : Alexandre Silva de Lima
1. Engenharia mecânica. 2. Energia elétrica. 3. Energia elétrica – Produção. 4. Turbinas hidráulicas. 5. Refinaria Duque de Caxias. I. Macedo, Vinícius. II. Lima, Alexandre Silva de (Orient.). III. Título.
- CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Lívia Lima CRB-7/5904

AGRADECIMENTO

A nossos pais que auxiliaram na construção de nossos princípios, na formação de nosso caráter. Pela capacidade de acreditar e investir sempre em nós, e que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que chegássemos até esta etapa da vida.

Dedico também essa vitória aos meus amigos, pela amizade sincera ao longo de todos esses anos e por compartilharem conosco momentos inesquecíveis, além de todo o aprendizado adquirido nesse tempo.

Às namoradas, por alegrarem nossos dias e nos incentivarem sempre a acreditar e dar nosso melhor. Por nos acompanharem e apoiarem em mais este desafio de nossas vidas.

RESUMO

O presente trabalho visa a otimização de uma unidade de processo dentro da refinaria de Duque de Caxias – Rio de Janeiro (REDUC), através da inclusão de uma turbina hidráulica no processo. A unidade estudada é a U-5100, que é uma unidade de tratamento de etano através da remoção do gás carbônico. Atualmente, o processo apresenta uma perda de pressão de 25 kgf/cm² (2,45 MPa) para 0,9 kgf/cm² (0,09 MPa) em uma válvula de controle (5100-LV-004) e depois a pressão é reestabelecida com uma bomba centrífuga de grande porte. O objetivo do projeto é reaproveitar a maior quantidade possível da perda de carga que ocorre atualmente nessa válvula para reduzir o consumo energético da unidade. A variação de pressão que ocorre nessa etapa do processo será transformada, através de uma turbina hidráulica, em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica, através de um gerador. Tendo feito os cálculos necessários e as análises/estudos sobre a seleção do conjunto ideal a ser utilizado, será feito o cálculo da viabilidade do processo e também o cálculo do payback desse investimento.

Palavras-chave: Petrobrás; Reaproveitamento; Válvula; Perda de carga; Conjunto turbina-gerador.

ABSTRACT

The following project intends to optimize a processing unit of an oil refinery at Duque de Caxias – Rio de Janeiro (REDUC), through the inclusion of a hydraulic turbine. The studied unit is U-5100, which is a unit of ethane treatment through the carbonic gas removal. In the actual project, the process presents a big pressure drop from 25 kgf/cm² (2,45 MPa) to 0,9 kgf/cm² (0,09 MPa) on a control valve (5100-LV-004) and after that, the process is re-established by a centrifuge bomb. The main objective of the Project is to use as much load loss happened on the valve as possible, in order to reduce the unit energy consumption. The reduction of pressure that occurs on this stage of the process will be transformed, through a hydraulic turbine, in mechanical energy and after that, using a generator, in electrical energy. With all the analyses and calculations about the turbine-generator done, calculations about the project's viability and its payback will be studied.

Key-words: Petrobras; Recovery of energy; Valve; Load loss; Turbine-generator.

Sumário

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Metodologia.....	2
1.4 Organização do trabalho.....	2
Capítulo 2.....	4
Revisão bibliográfica.....	4
2.1 Petrobras.....	4
2.2 Unidade de Duque de Caxias – Rio de Janeiro.....	4
2.3 Projeto CGPEX.....	7
2.3.1 Área de processo.....	7
2.3.2 Seção desetanização.....	8
2.3.3 Seção despropanização.....	8
2.3.4 Seção Desbutanizador.....	9
2.3.5 Seção do Desisopentanizador.....	9
2.3.6 Sistema de Refrigeração de Propano.....	10
2.4 Unidade de Remoção de CO ₂	11
2.5 Válvulas.....	14
2.5.1 Tipos de Válvulas.....	15
2.5.2 Válvulas de Controle.....	17
2.5.3 Válvulas de Controle Tipo Globo.....	19
2.6 Perda de Carga.....	24

2.7 Teorema de Bernoulli	27
2.8 Turbina Hidráulica	28
2.8.1 Turbina Pelton.....	29
2.8.2 Turbina Francis.....	31
2.9 Monoetanolamina (MEA).....	34
Capítulo 3.....	36
Cálculos e Desenvolvimento do Projeto	37
3.1 Cálculo de Perda de Carga	37
3.2 Seleção de turbina-gerador.....	40
3.3 Cálculo de viabilidade da instalação	47
Capítulo 4.....	50
Conclusão.....	50
Capítulo 5.....	51
Sugestões para trabalhos futuros.....	51
Referências bibliográficas	52
ANEXO 1 – Data sheet válvula 5100-LV-004.....	54
ANEXO 2 – Fluxogramas U-5100	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
CO ₂	Gás Carbônico
DEA	Dietanolamina
FCC	Craqueamento Catalítico em Leito Fluidizado
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HDT	Unidades de Hidrocarbonetos
IMTP	Intalox Metal Tower Packing
LGN	Líquido Gás Natural
MEA	Monoetanolamina
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
TEA	Trietanolamina

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Tela de controle da torre de absorção T-5100001	11
FIGURA 2: Tela de controle da torre de regeneração T-5100002	13
FIGURA 3: Válvula de controle – partes	17
FIGURA 4: Válvula de deslocamento linear	18
FIGURA 5: Válvula de deslocamento rotativo	18
FIGURA 6: Componentes de uma válvula globo	19
FIGURA 7: Válvula globo sede simples	20
FIGURA 8: Válvula globo sede dupla	20
FIGURA 9: Vista cortada de uma válvula globo gaiola	22
FIGURA 10: Tipos de gaiolas	22
FIGURA 11: Válvula gaiola balanceada	23
FIGURA 12: Válvula gaiola não balanceada	23
FIGURA 13: Diagrama de Moody	25
FIGURA 14: Rotor Pelton	30
FIGURA 15: Principais componentes de uma turbina Pelton	31
FIGURA 16: Principais componentes de um rotor Francis	33
FIGURA 17: Velocidade do fluxo em uma turbina Francis	33
FIGURA 18: Ação das pás sob o fluido dentro de uma turbina Francis	34
FIGURA 19: Reação para obtenção da Monoetanolamina	35
FIGURA 20: Válvula 5100-LV-004 (cortesia Petrobras)	41
FIGURA 21: Desgaste no interior da válvula globo gaiola (cortesia Petrobras)	41
FIGURA 22: Orçamento e características do conjunto turbina-gerador escolhido	46
FIGURA 23: Conjunto turbina-gerador selecionado	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Unidades de processamento de gás natural da Petrobras	06
TABELA 2: Coeficientes para determinadas perdas de carga localizadas	27
TABELA 3: Composição da MEA utilizada no processo	36
TABELA 4: Propriedades informativas da MEA	36
TABELA 5: Parte do datasheet da válvula 5100-LV-004	38
TABELA 6: Resumo do datasheet de turbinas Nengyuan Hydro	44
TABELA 7: Tabela auxiliar para seleção de turbinas de ação ou reação	46

Capítulo 1

Introdução

A Petrobrás é uma das maiores empresas do Brasil, e uma das maiores refinarias do mundo. Com 65 anos de história, a companhia é responsável por 100 % do refino de todo o petróleo encontrado no Brasil. O processo de refinaria é bastante longo e complexo, tendo um aproveitamento de vários derivados do petróleo, e não somente a tão popular, gasolina. Na unidade do Rio de Janeiro, REDUC, ocorre o processo de remoção de gás carbônico da corrente de etano (U-5100). É um projeto realizado pelo CENPES – Centro de Pesquisas da Petrobrás - para que seja possível a comercialização do Etano para petroquímicas como, por exemplo, a BRASKEM.

Antes da corrente de etano ser carga da U-5100, primeiramente as plataformas fazem a extração de petróleo e gás. Esse gás é tratado e retirado sua corrente mais leve (metano, usado como gás combustível). Diante disso, fica o que é chamado de LGN, liquido de gás natural. Esse liquido de gás natural é enviado para REDUC e na unidade que é chamado de fracionamento de liquido de gás natural é retirado e comercializado o etano, propano, butano, isopentano e gasolina.

Dentro da unidade de remoção de CO₂ da corrente de etano, acontece uma grande perda de carga (queda brusca de pressão) em uma válvula de controle de nível e, em seguida, um ganho de pressão através de uma bomba de grande porte.

O objetivo final do trabalho é inserir um equipamento (turbina) para reaproveitar essa perda de carga, e gerar energia mecânica, e com um gerador elétrico, enviar energia elétrica para a subestação da unidade. Ao final, será feito uma comparação com a quantidade de energia reaproveitada, o quanto conseguiríamos economizar pela geração de energia elétrica do gerador.

Todo o investimento que tiver que ser realizado para poder ser feito essa otimização da unidade será calculado e estudado e, dessa maneira, poder ter a avaliação da viabilidade do projeto.

1.1 Motivação

A REDUC é uma refinaria muito antiga e com alguns projetos ultrapassados. Atualmente a otimização de energia é fundamental para viabilidade de uma determinada produção. A maior motivação do projeto é exatamente utilizar uma energia que atualmente é quase que desperdiçada, para gerar energia elétrica que ajudará na alimentação de um processo na unidade.

1.2 Objetivo

Este projeto tem como objetivo estudar o funcionamento de uma unidade de remoção de CO₂ da corrente de etano e o funcionamento de um conjunto turbina-gerador em um processo de reaproveitamento de energia. Diante disso, será inserido dentro do processo da U-5100 um equipamento (turbina), para que haja o melhor reaproveitamento da brusca queda de pressão que não é aproveitada atualmente, ocorrida na válvula de controle 5100-LV-004.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho, foi baseado em pesquisa bibliográfica dos assuntos mais significativos, tendo como fonte, principalmente, livros, artigos nacionais e internacionais de congresso e também teses de graduação, mestrado e doutorado.

Após a preliminar leitura da literatura, e de trabalhos acadêmicos com temas relacionados aos deste projeto, foram feitos cálculos de acordo com o que foi lido e estudado, e posteriormente, feita uma análise dos valores encontrados, confrontando com as opções de solução para o projeto.

Posteriormente, foi avaliado a viabilidade da implantação do projeto e também o cálculo do payback para tal investimento.

1.4 Organização do trabalho

O capítulo um do projeto, traz uma introdução sobre o mesmo, indicando a motivação, metodologia, objetivo e organização do trabalho, servindo mais como uma base para identificar os pontos do trabalho.

No segundo capítulo, se tem a revisão bibliográfica do projeto, a qual traz todo a parte do conhecimento teórico do trabalho, explicando todos os pontos que são necessários entendimento para compreensão do desenvolvimento do projeto, como por exemplo:

- Petrobras e Reduc;
- Projeto CGPEX e seus processos;
- Válvulas, seus tipos e utilizações;
- Perda de carga e Teorema de Bernoulli;
- Turbinas;
- Monoetanolamina.

Já no terceiro capítulo, temos a parte em que é apresentado o desenvolvimento do projeto e seus respectivos cálculos para sua realização. Dentre eles, é apresentado o cálculo de perda de carga, cálculo das principais características da turbina para adaptação ao processo, seleção da turbina de acordo com os dados encontrados e o cálculo da viabilidade do projeto, junto com o seu payback.

Capítulo quatro traz as conclusões tirados sobre o projeto e todo o estudo feito em cima do mesmo, apresentado os critérios adotados.

E para finalizar o trabalho, o capítulo cinco são sugestões para possíveis futuros projetos que possam ajudar/ter relação com este.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Nesta seção serão abordados conceitos teóricos e práticos que são necessários para a compreensão do projeto e seus resultados finais.

2.1 Petrobras

Fundada em 1953 como resultado de uma campanha popular, a companhia tem como objetivo a pesquisa, a lavra, a refinação, o processamento, o comércio e o transporte de petróleo proveniente do poço, de xisto ou de outras rochas, de seus derivados, de gás natural e de outros hidrocarbonetos fluidos, além das atividades vinculadas à energia, podendo promover a pesquisa, o desenvolvimento, a produção, o transporte, a distribuição e a comercialização de todas as formas de energia, bem como quaisquer outras atividades correlatas ou afins.

Sua política de recursos humanos ajudou a montagem e execução deste projeto final: “A Petrobras acredita que a função de uma empresa não se resume a dar lucro e emprego, pagar impostos e cumprir leis” [19]. Consultando suas diretrizes foi verificado a possibilidade de utilizar informações e conteúdo do sistema Petrobras os quais foram fundamentais para elaboração do projeto.

2.2 Unidade de Duque de Caxias – Rio de Janeiro

A Refinaria de Duque de Caxias - REDUC é hoje a mais completa e complexa refinaria do sistema Petrobras, tendo sido inaugurada, em 1961, com apenas seis unidades, além da casa de força. Localiza-se na Rodovia Washington Luís, km 113,7, no distrito de Campos Elíseos (Duque de Caxias).

O complexo industrial da refinaria é distribuído numa área de aproximadamente 13km² e é responsável por cerca de 4,8 bilhões de reais por ano em impostos pagos ao governo. Um total de 52 produtos são comercializados por esta refinaria, dentre estes óleos básicos para lubrificantes, diesel, gasolina, GLP, nafta, querosene de aviação, parafinas, óleo combustível e aguarrás.

Uma série de unidades de processamento estão organizadas compondo o esquema de refino mais completo dentre as refinarias brasileiras. Dentre as unidades operacionais desta

refinaria, destacam-se: FCC (craqueamento catalítico em leito fluidizado), destilação atmosférica e a vácuo (3 conjuntos, 1 para combustíveis e 2 para lubrificantes), reforma catalítica, unidades de hidro tratamento (HDT), desasfaltação, além de várias unidades de processamento e tratamento de óleos básicos para lubrificantes, caldeiras e mais unidades de tratamento de derivados.

Em julho de 2008 foi iniciada a operação da Unidade de Coqueamento Retardado, que é responsável pelo processamento de matéria-prima pesada, convertendo em produtos nobres, como o diesel e nafta, além de produzir o coque. A construção desta unidade totalizou investimentos da ordem de US\$ 1 bilhão.

A REDUC está ampliando sua planta de gás natural, construindo novas unidades para atender à demanda por gás natural na região Sudeste do Brasil. Junto com estas unidades, também estão previstos tratamentos de dessulfurização de nafta craqueada e um investimento maciço em unidades de preservação do meio ambiente, como a recuperação de enxofre e tratamento de águas ácidas. Os investimentos de ampliação são estimados em US\$ 1,5 bilhão.

Várias outras obras de melhoria do sistema industrial da REDUC estão sendo previstas, visando a sua ampliação ou modernização para preservar a saúde dos trabalhadores, o meio ambiente e a excelência em qualidade dos processos e produtos da refinaria.

A REDUC foi pioneira na produção do óleo diesel S-50 no Brasil. Este novo produto possui 90% menos enxofre que o diesel anteriormente utilizado nas regiões metropolitanas (diesel S-500), contribuindo para a melhoria da qualidade do ar.

A seguir, encontra-se na tabela 1, a lista de unidades de processamento de gás da Petrobras no Brasil:

Unidade	Loc	Cap nom. (10 ³ m ³ /d) (*)	Processo Termodinâmica	Prod. Nominal (m ³)		
				GLP	C ₅₊	LGN
URUCU I	AM	600	Absorção refrigerada	178	11	-
URUCU II	AM	6000	Turbo-expansão	1990	113	-
URUCU III	AM	3000	Turbo-expansão	615	69	-
LUBNOR	CE	350	Absorção refrigerada	147	33	-
GUAMARÉ I	RN	2000	Absorção refrigerada	545	89	-
GUAMARÉ II	RN	2000	Turbo-expansão	632	168	-
GUAMARE III	RN	1500	Turbo-expansão	248	82	-
PILAR	AL	1800	Turbo-expansão	290	30	-
ATALAIA	SE	2000	Absorção refrigerada	580	250	-
CARMÓPOLIS	SE	350	Refrigeração simples	52	17	-
CATU I	BA	1400	Absorção refrigerada	330	150	-
CATU II	BA	2500	Turbo-expansão	-	91	302
MANATI	BA	6000	Joule thomson + RS	-	-	-
CANDEIAS	BA	2000	Absorção refrigerada	490	225	-
LAGOA PARDA	ES	150	Refrigeração simples	31	12	-
UPGN CABIÚNAS	RJ	600	Absorção refrigerada	179	15	-
URGN CABIÚNAS	RJ	3000	Refrigeração simples	-	-	1100
UPCGN CABIÚNAS	RJ	1500 (**)	Condensado	689	295	-
URL I CABIÚNAS	RJ	5400	Turbo-expansão	-	-	3000
URL II CABIÚNAS	RJ	5400	Turbo-expansão	-	-	3000
REDUC I	RJ	2400	Absorção refrigerada	564	94	-
REDUC II	RJ	2400	Turbo-expansão	576	51	-
UGN RPBC	SP	2300	Joule thomson + RS	-	-	1500

(*) condições a 101,3KPa e 20°C
RS – refrigeração simples
(**) m³/d de gás natural

Tabela 1: Unidades de processamento de gás natural da Petrobras [1]

2.3 Projeto CGPEX

Para que possa ser dado o objetivo do projeto, antes é necessário dar uma introdução e explicar como a unidade trabalha e suas variáveis.

A Planta para o Projeto CGPEX consiste de duas Unidades. Uma é a Unidade de Fracionamento de Líquidos, incluindo Seção do Desetanizador e Sistema de Refrigeração de Propano como parte da U-5000. A outra é a Unidade de Remoção de CO₂ do Etano (U-5100).

A U-5100 é planejada para remoção de CO₂ do etano que vem da U-2600, bem como da U-5000.

2.3.1 Área de processo

A Unidade de Fracionamento de Líquidos pode ser operada no modo de recuperação de etano (caso normal) com uma capacidade nominal de 2371 t/d LGN e modo de rejeição de etano (caso alternativo) com 1364 t/d LGN. No caso do projeto, a unidade tem que operar produzindo etano para que seja necessária a otimização da planta.

É muito simples entender a diferença entre os tipos de operação da unidade:

- O caso normal de operação é quando o sistema de propano está resfriando o topo da torre, enquadrando o etano que será tratado através da remoção do CO₂. Dessa maneira, a unidade produz 994 t/d de etano, 732 t/d de propano, 482 t/d de butanos, 120 t/d de isopentano e 165 t/d de C5+.
- O caso alternativo se faz quando o líquido de gás natural entra direto na torre despropanizadora (T-50002). Assim a unidade produz 737 t/d de propano, 465 t/d de butano, 120 t/d de isopentano e 165 t/d de C5+. O etano proveniente da carga é aproveitado no sistema de gás combustível ou queimado no sistema de tocha (Flare).

A Unidade de Remoção de CO₂ do Etano foi planejada para uma capacidade de 1336 t/d de etano, derivada do Fracionamento de LGN (U-5000) e da UPGN II (U-2600).

2.3.2 Seção desetanização

O Líquido de Gás Natural, que é entregue a 38°C e 32 kgf/cm²g (3,14MPa) do limite da bateria, é dividido em dois fluxos. O primeiro fluxo vai para a Torre Desetanizadora (T-500001) como alimentação superior. O outro fluxo é primeiramente pré-aquecido através da troca com o produto do fundo da Torre Desetanizadora (T-500001) no Aquecedor de Alimentação do Desetanizador (P-500001 A/B), tornando-se então a alimentação inferior da T-500001.

Esta coluna possui um Refervedor de Desetanizador (P-50003), com vapor de baixa pressão como fluido de aquecimento, e um Condensador de Desetanizador (P-500002), onde o vapor aéreo da T-500001 é parcialmente condensado pelo propano refrigerante. O fluxo de duas fases do Condensador de Desetanizador vai para o Acumulador de Refluxo do Desetanizador (V-500001). O líquido coletado em V-500001 é bombeado de volta para a coluna, como refluxo, pela Bomba de Refluxo do Desetanizador (B-500001 A/B). O vapor (produto do etano) de V-500001 é aquecido no Sub-resfriador de Propano (P-500013), sub-resfriando o fornecimento de propano refrigerante para P-500002 e, então, é enviado para o Sistema Reduc, ou para a Unidade de Remoção de CO₂ do Etano (U-5100) junto com o etano da U-2600.

O produto de fundo da T-500001 (C3+) é resfriado em P-500001 A/B e enviado para a Seção do Despropanizador da U-5000.

2.3.3 Seção despropanização

O Líquido de Gás Natural do limite de bateria (no caso alternativo) é dividido em dois fluxos. O primeiro fluxo vai para a Torre Despropanizadora (T-500002) como alimentação superior. O outro fluxo é primeiramente pré-aquecido por parte do produto de fundo da Torre Despropanizadora (T-500002) no Aquecedor de Alimentação do Despropanizador (P-500004 A/B) e, então, torna-se a alimentação inferior da T-500002. Esta coluna possui um Refervedor de Despropanizador (P-500005 A/B), com vapor de pressão média como fluido de aquecimento e um Condensador de Despropanizador (P-500005 A/B), onde o vapor aéreo da T-500002 é totalmente condensado pela água de refrigeração e vai para o Acumulador de Refluxo do Despropanizador (V-500002). A Bomba de Refluxo do Despropanizador (B-500002 A/B) retorna parte do líquido para T-500002 como refluxo e o produto líquido (produto propano) é

resfriado no Resfriador de Propano (P-500006) pela água de refrigeração antes de ir para o limite da bateria.

O produto de fundo da T-500002 (C4+) é dividido em dois fluxos e enviado à Seção do Desbutanizador.

2.3.4 Seção Desbutanizador

O primeiro fluxo do fundo T-500002 é resfriado em P-500004 A/B e vai para a Torre Desbutanizadora (T-500003) como alimentação superior. O outro fluxo é primeiramente pré-aquecido pelo produto de fundo de T-500003 no Aquecedor de Alimentação do Desbutanizador (P-500008) e, então, torna-se a alimentação inferior de T-500003. Essa coluna possui um Refervedor de Desbutanizador (P-500011), com vapor a baixa pressão como fluido de aquecimento e um Condensador de Desbutanizador (P-500009), onde o vapor aéreo de T-500003 é totalmente condensado pela água de refrigeração e vai para o Acumulador de Refluxo do Desbutanizador (V-500003). A Bomba de Refluxo do Desbutanizador (B-500003 A/B) retorna parte do líquido para T-500003 como refluxo e o produto líquido (produto de butanos) é resfriado no Resfriador de Butano (P-500010) pela água de refrigeração antes de ir para o limite da bateria.

O produto de fundo de T-500003 é um fluxo de C5+. Ele é primeiramente resfriado enquanto aquece a alimentação inferior da coluna em P-500008 e é enviado para a Seção do Desisopentanizador.

2.3.5 Seção do Desisopentanizador

O fluxo do fundo de T-500003 vai para a Torre Desisopentanizadora (T-500004) como alimentação. Essa coluna possui um Refervedor de Desisopentanizador (P-500016), com vapor de baixa pressão como fluido de aquecimento e um Condensador de Desisopentanizador (P-500012), onde o vapor aéreo de T-500004 é totalmente condensado pela água de resfriamento e vai para o Acumulador de Refluxo do Desisopentanizador (V-500009). A bomba de Refluxo do Desisopentanizador (B-500005 A/B) retorna parte do líquido para T-500004 como refluxo e

o produto líquido (produto de isopentano) é resfriado no Resfriador de Isopentano (P-500015) pela água de resfriamento antes de ir para o limite da bateria.

A Bomba C5+ (B-500006 A/B) transfere o produto de fundo de T-500004 (C5+) para o Resfriador (P-500017), onde o produto C5+ é resfriado pela água de resfriamento antes de ir para o limite de bateria.

2.3.6 Sistema de Refrigeração de Propano

O Sistema de Refrigeração de Propano serve para condensação de OVHD do Desetanizador e para fazer o refluxo para a Torre Desetanizadora.

O propano líquido saturado é armazenado no Acumulador de Propano (V-500004) a uma temperatura de 38°C. Esse propano é enviado para o Sub-resfriador de Propano (P-500013), onde é resfriado por troca com o produto de etano frio do Desetanizador suspenso. O líquido de propano sub-resfriado de P-500013 oferece a composição refrigerante para o Condensador do Desetanizador P-500002. É expandido na válvula de controle de nível (LV-006) de P-500002 de 12 kg/cm²G (1,18MPa) para 3,1 kg/cm²G (0,30MPa), e sua temperatura cai para -5.0°C. Esse fluxo oferece refrigeração para P-500002 nesse nível de temperatura. O propano é totalmente vaporizado nesse trocador de calor e o vapor vai para o Separador de Propano (V-500005), onde todo líquido é separado do fluxo. O vapor de V-500005 flui para o Compressor de sucção de propano.

Normalmente, não há nível de líquido no Separador de Propano (V-500005). Quando um nível de líquido de propano aparecer em LI-5000049, o refrigerante de propano acumulado deve ser enviado de volta para o Acumulador de Propano (V-500004) através de 2"-HC-5000-139 pela Bomba pela Válvula de Vácuo (B-500004) para evitar a parada muito elevada do nível de líquido do Compressor de Propano.

O gás do Compressor de Propano é condensado pela água de refrigeração no Condensador de Propano (P-500014A...D) e o líquido condensado vai de volta para o Acumulador de Propano (V-500004), fechando o ciclo. O resfriador de líquido tirado à jusante do Sub-resfriador de Propano (P-500013) é provido para by-pass de fluxo mínimo para operação sem carga ou com carga baixa.

O gás tratado emerge da parte superior de T-510001 e passa pelo decantador de Etano Tratado (V-510002), onde toda solução de MEA arrastada é apanhada. O gás tratado vai para o craqueamento de Vapor ou Sistema REDUC. Qualquer solução de MEA apanhada em V-510002 é automaticamente drenada para o Regenerador MEA T-510002 no nível controle de LS-5100006.

A solução de MEA rica solução deixa o fundo de T-510001, sob controle de nível (LIC-004), e vai para o sistema de regeneração.

A MEA rica é aquecida no Trocador de MEA Rica/Pobre (P-510001A/B) para diminuir a taxa de calor do Refervedor de Regenerador de MEA, e sua pressão é reduzida em LV-004 de 22,3 kg/cm²G (2,19MPa) para 0,9 kg/cm²G (0,09MPa) antes de ir para o Regenerador de MEA (T-510002), onde o CO₂ é liberado da solução de MEA. Os vapores que saem do topo de T-510002 são parcialmente condensados por água de refrigeração no Condensador Suspenso do Regenerador de MEA (P-510002) e vai para o Tambor Suspenso do Regenerador de MEA (V-510003). O gás ácido separado nesse recipiente é enviado, sob controle de pressão (PIC-020A), para o limite da bateria. O condensado de V-510003 é bombeado pela Bomba de Refluxo do Regenerador de MEA (B-510002A/B) de volta para T-510002 e inclui o refluxo do topo.

A T-510002 tem duas camadas de guarnição metálica e um recipiente de escoamento total, onde todo o líquido que desce na coluna é coletado e enviado para o Refervedor do Regenerador de MEA (P-510003A/B). O P-510003A/B é responsável por gerar o vapor de retificação necessário para remover o CO₂ da solução de MEA.

A seguir, podemos visualizar melhor, através da figura 2, um layout que é utilizado na unidade para controle da torre de regeneração T-510002:

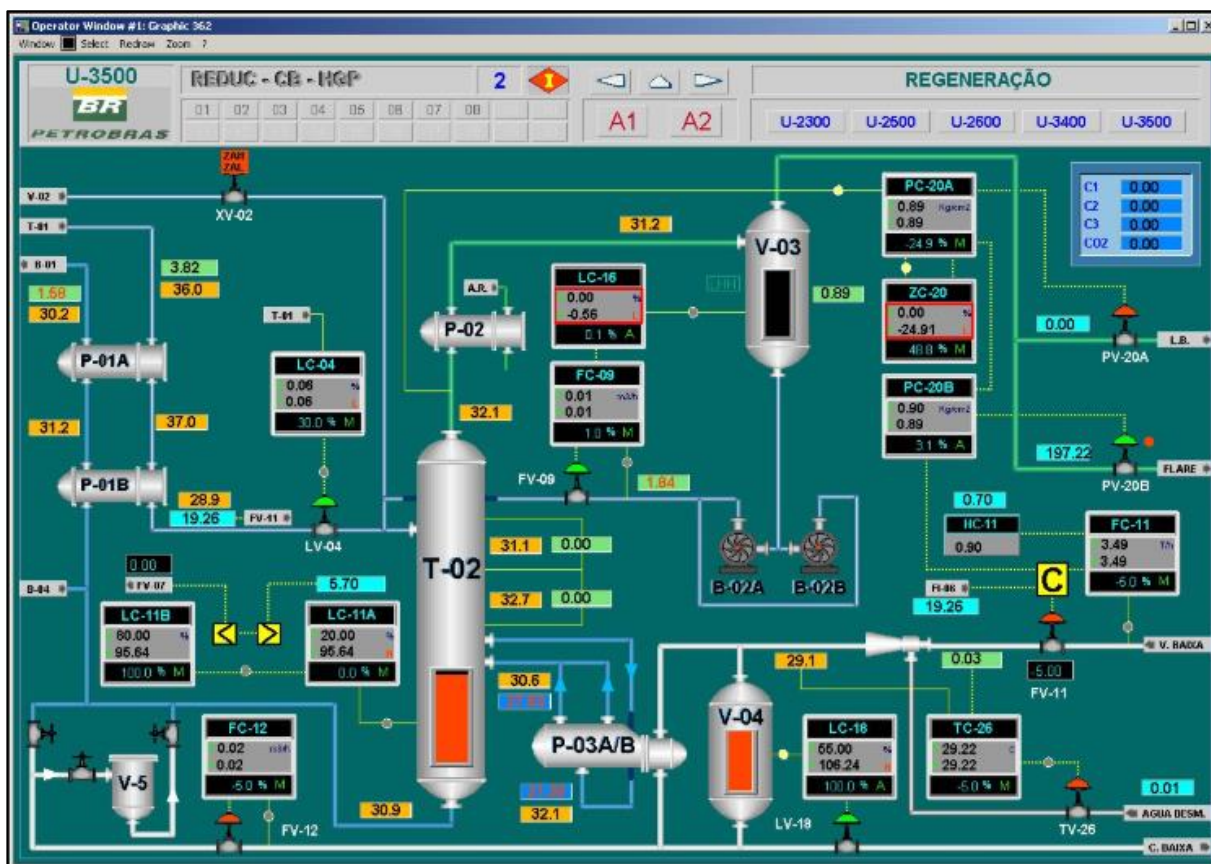


Figura 2: Tela de controle da torre de regeneração T-510002.

O meio de aquecimento usado em P-510003A/B, que é injetado sob controle de taxa de fluxo, é vapor de baixa pressão. Um sistema de superaquecimento de vapor foi instalado, de forma a manter o vapor em sua temperatura de saturação. Essa temperatura não deve exceder 142°C, a fim de evitar reações de degradação de MEA em P-510003A/B. A água desmineralizada é usada como fluido redutor de superaquecimento e é injetada à montante de P-510003A/B por TV-026.

O condensado de efluente de P-510003A/B é coletado no Reservatório de Condensado (V-510004) e, então, é enviado, sob controle de nível por LIC-018 ao Sistema de Condensado da REDUC.

O vapor de MEA pobre que sai do fundo de T-510002, recebe uma injeção de condensado para compensar para as perdas de água. Para essa operação é usada parte do condensado coletado em V-510004, que é injetado sob controle de fluxo por FIC-012. Se a compensação para a perda de água não for suficiente, a concentração de solução de amina fica muito alta, necessitando de uma temperatura de regeneração aumentada para tentar degradar a amina e/ou aumentar as perdas de amina.

A MEA pobre é resfriada em P-510001A/B, passa pela Bomba de MEA Pobre (B-510001A/B) e vai para o Filtro a Cartucho de MEA (FT-510001). O propósito desse filtro é remover produtos de corrosão, polimerização e substâncias particuladas em geral.

Após a filtragem, o vapor de MEA pobre tem sua temperatura ajustada no Resfriador de MEA Pobre (P-510004A/B). A solução de MEA pobre filtrada e resfriada vai para T-510001, sob controle da taxa de fluxo (FFIC-007) fechando o circuito de tratamento.

A Unidade também inclui o Tanque de MEA (TQ-510001) com a Bomba do Tanque de MEA (B-510005), a Bomba de Composição de MEA (B-510004) e o Tambor de Injeção Ante Espuma (V-510005).

TQ-510001 tem capacidade para reter o estoque total da solução de MEA. A tubulação em volta do tanque é arranjada de forma a permitir o recebimento e o envio da solução de MEA de/para o sistema.

A Bomba de Composição de MEA B-510004 é usada para transferir a MEA, que é armazenada nos tambores, para o sistema.

O Tambor de Injeção Ante Espuma V-510005 é responsável pela injeção do composto ante espuma no sistema para evitar problemas de formação de espuma. O agente ante espuma é injetado no vapor de condensado a partir de V-51004, que compensa as perdas de água na Unidade.

O sistema de recuperação de MEA consiste do Tanque de Drenagem de MEA (TQ-510002), que é localizado abaixo do nível inferior e recebe as linhas de esgoto de MEA, e a Bomba de MEA Recuperada (B-510003), que é usada para esvaziar TQ-510002. A amina recuperada de TQ-510002 é bombeada para o Tanque de MEA TQ-510001, ou enviada de volta para o vapor de circulação de MEA via Bomba de MEA Pobre (B-510001A/B).

2.5 Válvulas

Válvulas podem ser utilizadas para controle do fluxo de fluidos em geral. Também conhecidas como registros, reguladores, entre outros, esses equipamentos podem ser encontrados em praticamente 100% das instalações industriais. Há um vasto número de configurações para válvulas, e dependendo da sua utilização, podem ser de inúmeros tamanhos, desde de pequenas peças para uso doméstico até para controle de hidrelétricas.

As válvulas mecânicas são muito numerosas quanto as suas permutações. A mais comum e mais básica é a válvula de porta, que possui duas posições, aberta e fechada. Outra

muito comum é a válvula gaveta, que também conhecemos como registro, normalmente encontrados em residências.

Uma válvula globo é um pouco mais complexa, controlando não apenas o fluxo do líquido, mas também a quantidade, e é também chamado de acelerador. Por exemplo, a maioria das torneiras são formadas por uma válvula globo, permitindo aos usuários girar sobre o equipamento para liberar a água e determinar o quanto de água vai fluir para fora. Os fabricantes também fazem válvulas de retenção, destinadas a restringir o fluxo de uma substância para uma única direção, e as válvulas de segurança, que são capazes de liberar níveis perigosos de pressão.

Uma válvula pode ser controlada manualmente, como uma torneira, ou controlada por um sistema de grande complexidade, como é o caso de um carro, onde as válvulas abrem e fecham de modo a permitir que o combustível seja capaz de entrar no cilindro. No caso de uma válvula de segurança, a válvula pode ser ajustada para disparar quando um nível de pressão é atingido, ou quando um sinal de emergência é enviado para que exerça este controle. Geralmente, ela está equipada com uma pequena mola que irá mantê-la fechada até o momento em que precise ser aberta. Em outros casos, as válvulas podem ser controladas pelos utilizadores por meio de um sistema de computador, como é o caso em condutas de gás, óleo, água e que a extensão da linha é quilométrica, onde técnicos em um centro de controle operacional podem abrir e fechá-las remotamente, conforme a necessidade, garantindo assim o bom fluxo do sistema.

2.5.1 Tipos de Válvulas

Pode-se dividir as válvulas em 3 tipos, de acordo com a forma de operação de seu atuador [8]:

- Operação Manual
 - Por meio de volante;
 - Por meio de alavanca;
 - Por meio de engrenagens, parafusos sem fim, etc.

- Operação Motorizada
 - Pneumática;
 - Hidráulica;
 - Elétrica.

- Operação Automática
 - Pelo próprio fluido;
 - Por meio de molas e contrapeso.

Além da divisão feita acima, é também encontrada em algumas literaturas [18] uma outra maneira de locação dos tipos de válvulas, que é através da sua função na instalação. A seguir, encontramos as funções das válvulas, conforme foi falado, e também exemplos de válvulas correspondentes à essa função:

- Função de Bloqueio:
 - Gaveta – utilizada para líquidos em geral (não sejam muito corrosivos);
 - Macho – utilizada para bloqueios rápidos, de líquidos e de vapor;
 - Esfera – utilizada para pequenas perdas de carga;
- Função de Regulagem:
 - Globo – utilizada para líquidos em geral (não sejam muito corrosivos), vapor e gases;
 - Agulha – utilizada para regulagem fina de líquidos e gases;
 - Controle – utilizada pela presença do atuador, normalmente controladas à distância;
 - Borboleta – utilizada para serviços com fluidos corrosivos e erosivos (sedimentos);
 - Diafragma – utilizada para segurança, como para fluidos corrosivos e tóxicos.
- Função de permitir o fluxo em apenas um sentido:
 - Retenção – utilizada para fluxos pulsantes;
 - Retenção e fechamento – utilizada para reter na posição aberta e bloquear na fechada;
 - Pé – utilizada para manter a escorva da linha de sucção de bombas.
- Função de controlar a pressão a montante:
 - Segurança e alívio – utilizada para gases: abertura rápida e líquidos: abertura gradual;
 - Excesso de vazão – utilizada em casos que ocorre excesso de vazão, através da mola.
- Função de controlar a pressão a jusante:
 - Redutoras – utilizada em grande parte para vapor, pode ser direta ou auto operada;
 - Reguladoras – utilizada para evitar a flutuação da pressão no sistema.

- Quebra vácuo – utilizada para aliviar automaticamente uma condição de vácuo indesejada.

2.5.2 Válvulas de Controle

A válvula de controle tem um papel muito importante no controle de modernas instalações indústrias, que dependem da correta distribuição e controle de fluídos. Tais controles, sejam para trocas de energia, redução de pressão ou simplesmente para encher um reservatório, dependem de algum tipo de instrumento de controle para fazer esse serviço.

Apesar de sua vasta utilização, provavelmente não exista outro elemento qualquer no sistema de controle, que receba menor parcela de atenção. Em muitas instalações, a válvula de controle é mais sujeita a severas condições de pressão, temperatura, corrosão e contaminação do que qualquer outro componente, e ainda assim, deve trabalhar satisfatoriamente com um mínimo de atenção. Por todo esse desgaste, as válvulas são uma das principais partes de uma instalação industrial que mais precisa de manutenção [2].

A seguir (figura 3), encontramos uma ilustração de como pode ser feita a divisão de uma válvula de controle, em suas principais partes:

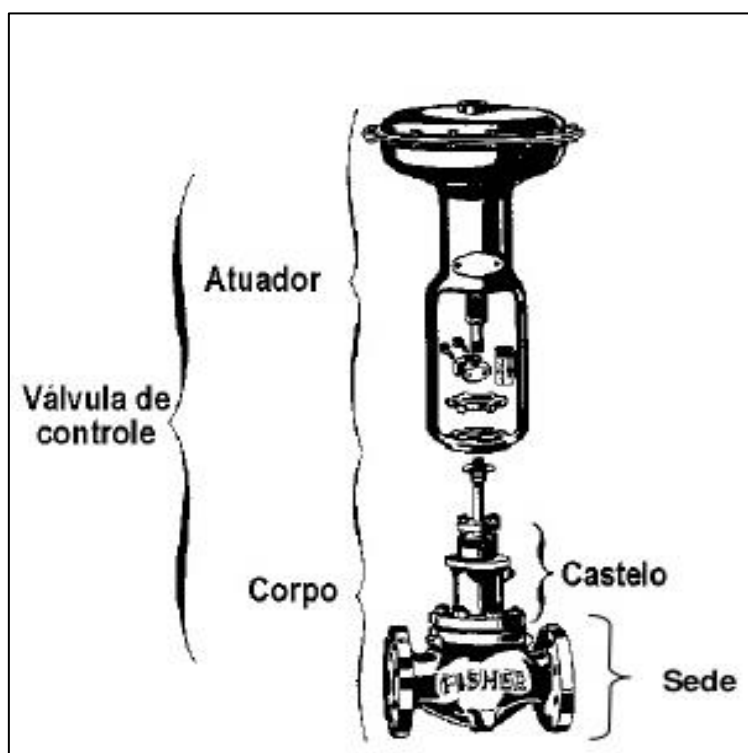


Figura 3: Válvula de Controle - Partes

O corpo, é a parte da válvula que executa a ação de controle, permitindo maior ou menor passagem do fluído no seu interior, conforme a necessidade do processo. O conjunto do corpo divide-se basicamente nos seguintes subconjuntos:

- Internos
- Castelo
- Flange inferior.

Nem todos os tipos de válvulas possuem obrigatoriamente o seu conjunto do corpo formado por todos os sub - componentes acima mencionados. Em alguns tipos de válvulas, corpo e castelo formam uma só peça denominada de apenas corpo; em outros nem existe o flange inferior.

Porém, por ora desconsidera-se tais particularidades, optando por um conceito mais global, para posteriormente irmos restringindo-o à medida em que formos analisando cada tipo de válvula de controle.

Sendo conjunto do corpo, a parte de válvula que entra em contato direto com o fluído, deve satisfazer os requisitos de pressão, e temperatura e corrosão do fluído. Os tipos de válvulas classificam-se em função dos respectivos tipos de corpos, e, portanto, quando estivermos falando de tipos de válvulas subentenderemos tipos de corpos.

Pode-se agrupar os principais tipos de válvulas em dois grupos: deslocamento linear (figura 4) e deslocamento rotativo (figura 5):

- Deslocamento Linear:
 1. Globo Convencional;
 2. Globo 3 Vias;
 3. Globo Gaiola;
 4. Globo Angular;
 5. Diafragma;
 6. Bipartido;
 7. Guilhotina.

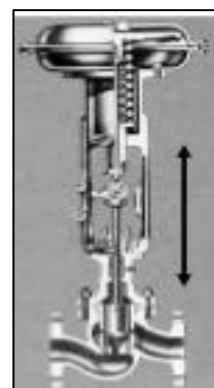


Figura 4: Válvula de Deslocamento Linear [2].

- Deslocamento Rotativo:
 1. Borboleta;
 2. Esfera;
 3. Obturador;
 4. Excêntrico.

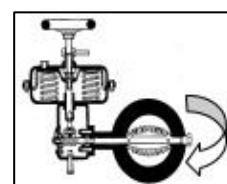


Figura 5: Válvula de Deslocamento Rotativo [2].

2.5.3 Válvulas de Controle Tipo Globo

Existem dois tipos principais de concepção de válvulas de controle tipo globo: a mais usual é a globo gaiola, a qual poucos fabricantes ainda fabricam, e a globo convencional, de construção um pouco mais cara. Essas válvulas são consideradas de alta performance, por permitir o uso em diferenciais de pressão de 1 a 3000 PSI e temperaturas de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+580\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

Válvulas tipo globo são utilizadas para controle de fluxo e para fechamento em fluidos que contenham algumas partículas solidas em suspensão. O nome é em virtude do formato do seu corpo.

O funcionamento é através do movimento de um disco ou de uma cunha redonda, fechando um orifício para bloquear o fluxo do fluido. O movimento do disco e o fechamento do orifício são feitos no sentido vertical ao eixo da válvula, induzindo o fluxo a mudar de direção duas vezes por 90° . Esta mudança de direção causa uma alta turbulência no fluido e conseqüentemente uma alta perda de carga ou energia no fluxo.

A seguir, pode-se conferir os principais componentes de uma válvula globo (figura 6):

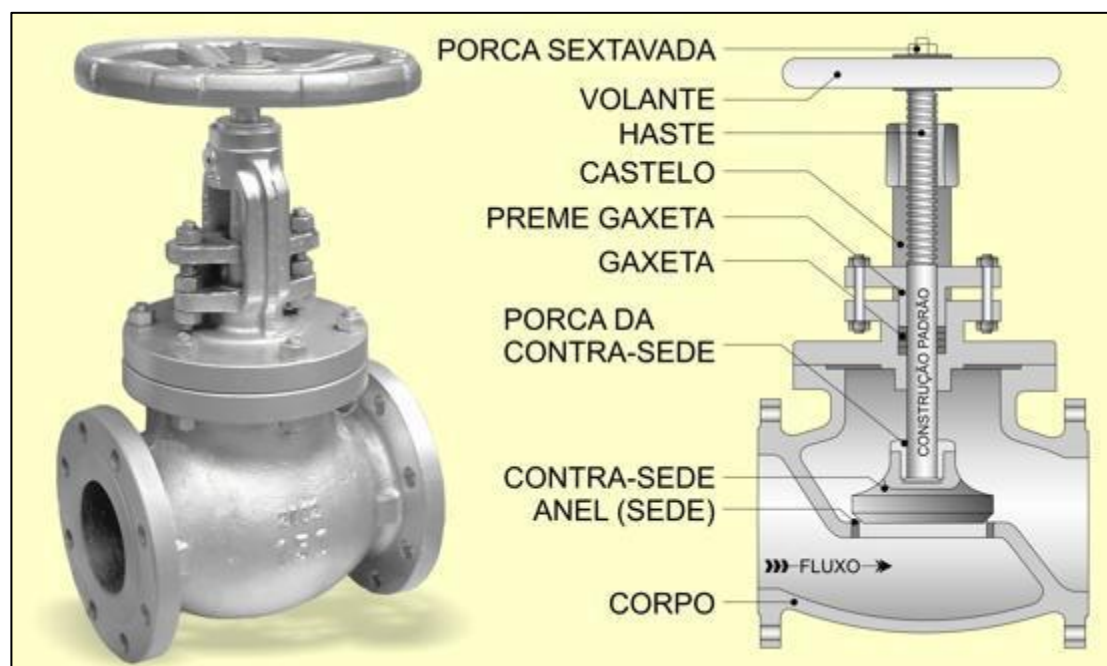


Figura 6: Componentes de uma Válvula Globo [2].

- **Válvula Globo Convencional**

Atualmente, é a mais utilizada nas instalações de indústrias. Válvula com formato globular, corpo normalmente de duas vias, de passagem reta, interna de sede simples ou de sede dupla. Ela será de sede simples (figura 7) ou dupla (figura 8), de acordo com a quantidade de orifícios que possua para realizar a passagem do fluido em questão.

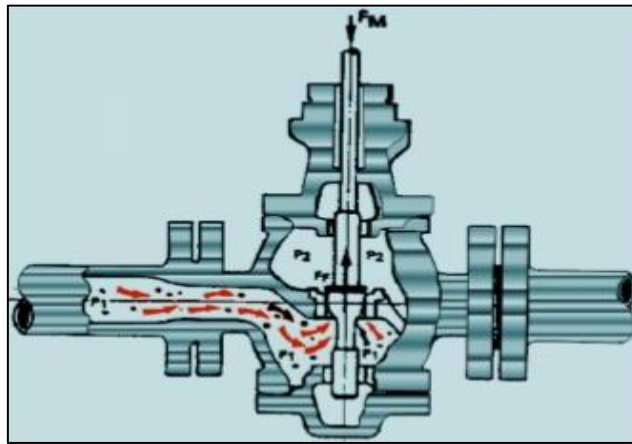


Figura 7: Válvula Globo Sede Simples [2].

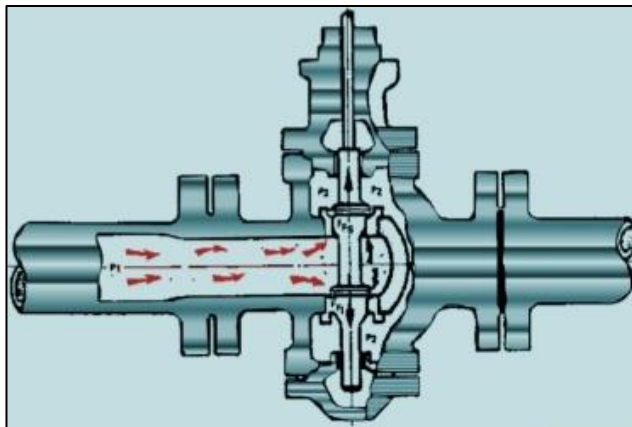


Figura 8: Válvula Globo Sede Dupla [2].

Válvulas globo de sede simples possuem menor custo de fabricação, fácil manutenção, operação simples e fecham com pouco ou nenhum vazamento, por possuírem obturador estaticamente não balanceado são classificadas como classe IV, ou seja, ocasionam um vazamento quando a válvula totalmente fechada da ordem de 0,01% da sua capacidade de vazão máxima. Seu inconveniente é que mais força é necessário para o atuador posicionar o obturador, este fato se deve por ser uma válvula cujo obturador não é balanceado.

Sempre que possível, as válvulas de sede simples devem ser instaladas de tal forma que a vazão tende a abrir. Isto resulta em operações suave e silenciosa, com máxima capacidade. Quando válvulas de sede simples são instaladas de forma que a vazão tende a fechar a válvula, é possível o martelamento da sede pelo obturador fenômeno conhecido como “CHATTERING”, se a força de desequilíbrio é relativamente alta em comparação com a força de posicionamento do obturador.

Já as válvulas globo de sede dupla, foram desenvolvidas para atender a necessidade de uma válvula que poderia ser posicionada com força relativamente pequena em seu atuador. Se as duas sedes tiverem o mesmo tamanho, as pressões que atuam sob o obturador serão equilibradas na posição fechada, e teoricamente pouca força será requerida para abrir ou fechar a mesma, o que é basicamente a sua principal vantagem. Como desvantagem, a sede dupla apresenta um vazamento maior que a de sede simples. Quando totalmente fechada, apresenta um vazamento de 0,5 % da sua capacidade de vazão.

- **Válvula Globo Tipo Gaiola**

Válvula gaiola é um equipamento de concepção antiga onde possui seus internos um pouco diferente da válvula globo convencional. A única diferença entre as válvulas globo convencional e a tipo gaiola é o tipo de guia do obturador, em conjunto com a possibilidade de balanceamento das forças do fluido agindo sobre o obturador, garantindo uma distribuição uniforme do fluxo ao redor do obturador por meio do sistema de janelas. O amplo sucesso deste estilo de válvula está totalmente fundamentado nos seguintes aspectos:

- Facilidade de remoção das partes internas, pela ausência de roscas o que facilita bastante a operação na própria instalação;
- Alta estabilidade de operação proporcionada pelo exclusivo sistema de guia do obturador;
- Capacidade vazão da ordem de 20 a 30% maior que a globo convencional;
- Menor peso das partes internas, resultando assim uma menor vibração horizontal consequentemente menor ruído de origem mecânica do que as válvulas globo duplamente guiadas;
- Não possuindo flange inferior a válvula é algo mais leve que as válvulas globo convencionais;

- Por não possuir flange inferior, seu corpo não pode ser reversível, e assim a montagem dos seus internos é do tipo *entra por cima*. A drenagem do fluido quando necessária, pode ser realizada através da parte inferior do corpo, por meio de um tampão rosqueado.

Abaixo, podemos encontrar ilustrações da vista cortada de uma válvula globo gaiola (figura 9) e alguns exemplos de tipos de gaiolas comercializadas (figura 10):

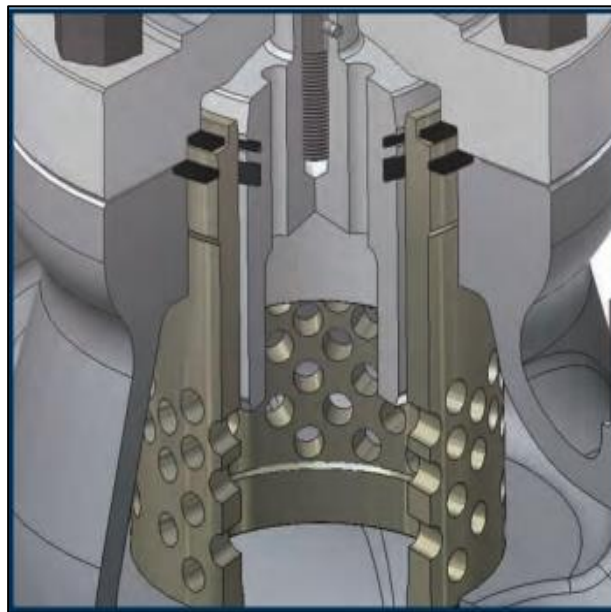


Figura 9: Vista cortada de uma Válvula Globo Gaiola [4].



Figura 10: Tipos de Gaiolas [4].

- **Válvula Globo Tipo Sede Simples Gaiola Balanceada**

Neste tipo de válvula (figura 11 abaixo) o obturador é balanceado dinamicamente, devido ao seu orifício interno, que faz com a pressão do fluido comunique-se com ambos os lados do obturador, formando-se assim um balanceamento de forças de atuação. O fluido neste tipo de válvula entra por cima e não apresenta uma boa vedação, permitindo um vazamento de até 0,5% da máxima capacidade de vazão, estando a mesma classificada na Classe II.

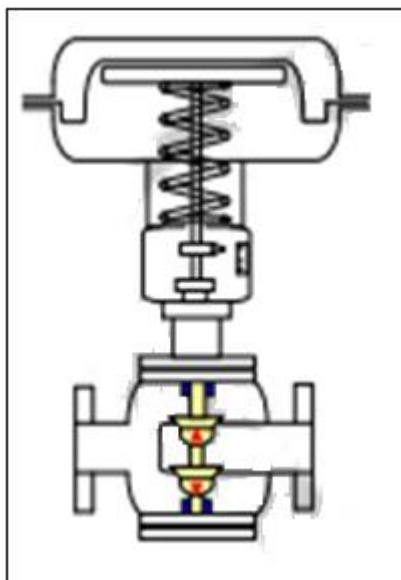


Figura 11: Válvula Gaiola Balanceada [3].

- **Válvula Globo Tipo Sede Simples Gaiola Não Balanceada**

Apresenta um vazamento de 0,01% da sua máxima capacidade de vazão, quando totalmente fechada, enquadrada na Classe IV. Fabricada em diâmetros de 1/2" até 6" nas classes de 150, 300 e 600 lbs. Abaixo, representação do obturador não balanceado (figura 12):

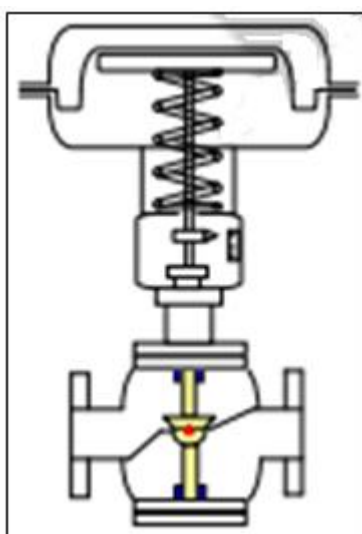


Figura 12: Válvula Gaiola Não Balanceada [3].

2.6 Perda de Carga

Ao escoar ao longo dos dispositivos adequados, fluidos acabam cedendo parte de sua energia para vencer resistências que aparecem durante esse caminho. Esta energia despendida pelo fluido para que possa escoar entre duas seções é chamada de perda de carga [9].

Ao falar sobre perda de carga, automaticamente pensamos em uns aspectos que estão ligados diretamente à mesma:

- Viscosidade;
- Número de Reynolds;
- Rugosidade dos encanamentos;
- Conexões, peças especiais e válvulas.

A resistência que os líquidos oferecem ao escoamento é um fenômeno de inercia-viscosidade e é caracterizada pelo número de Reynolds (Re), que é basicamente a relação entre as forças de inercia e as forças de atrito interno (forças de cisalhamento) atuantes durante o escoamento.

A grande importância do número de Reynolds reside no fato de:

1. Estabelecer a lei de analogia entre dois escoamentos;
2. Caracterizar a natureza do escoamento;
3. Calcular o coeficiente de perda de carga.

Para caracterizar a natureza do escoamento, podemos dividir o escoamento permanente em três maneiras:

- Regime laminar – Re é menor que 2320;
- Regime crítico – Re está entre 2320 e 4000;
- Regime turbulento – Re é maior que 4000.

Podemos encontrar o valor (adimensional) do número de Reynolds através da fórmula:

$$Re = \rho * v * D / \mu \quad (1)$$

Onde:

- ρ = massa específica do fluido;
- v = velocidade média do fluido;
- μ = viscosidade dinâmica do fluido;
- D = diâmetro para o fluxo do fluido.

Com o valor de Reynolds calculado, conseguimos então através do diagrama de Moody (veja na figura 13 a seguir), encontrar o valor de atrito do fluido f e a rugosidade (ε/d) que serão necessários para dar continuidade ao cálculo da perda de carga total na instalação.

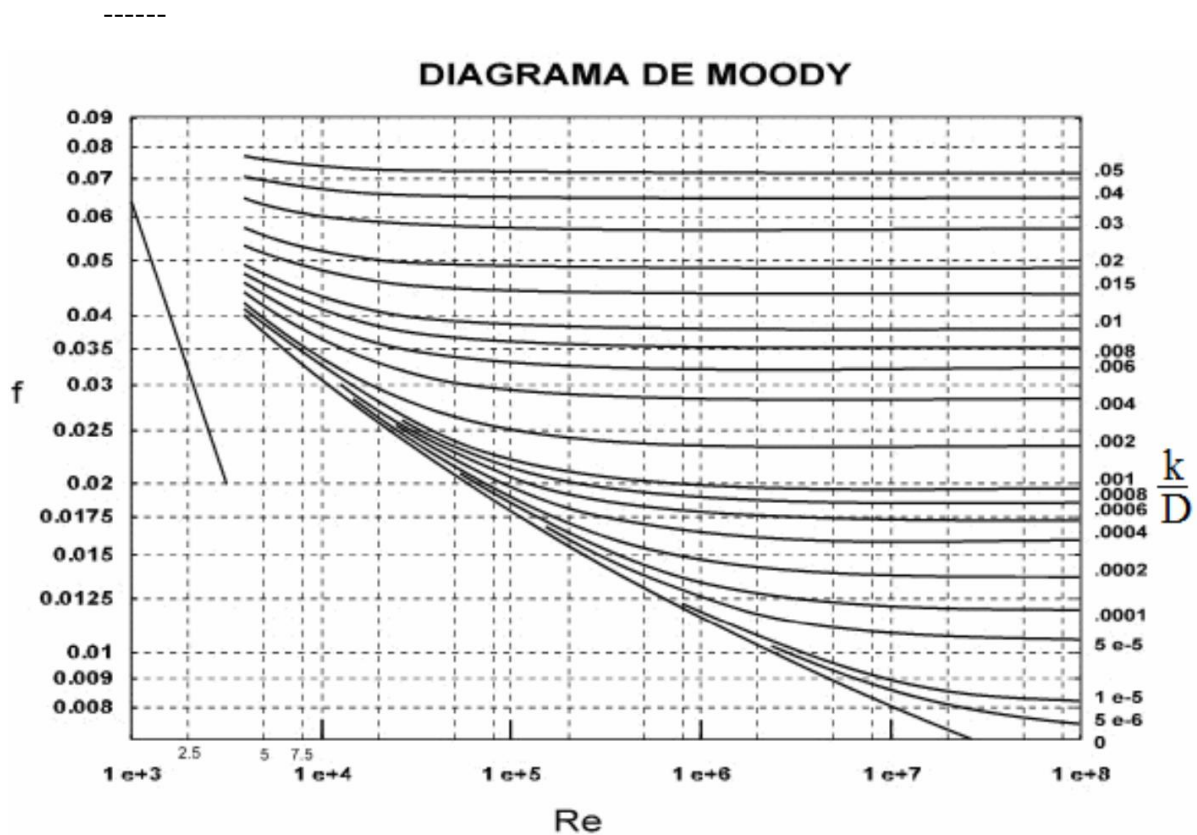


Figura 13: Diagrama de Moody [6].

A perda de carga total do fluido em um escoamento pode ser dividida em dois: perdas de carga localizadas e perda de carga ao longo do escoamento.

Perdas de carga localizada representam normalmente a maior parte da perda de carga total do processo. Essas perdas ocorrem em sua grande maioria quando o fluido gasta uma energia para vencer a resistência que ocorre quando na tubulação o fluido encontra conexões, válvulas, permutadores, turbinas, alargamento brusco, entre outros tipos. Podemos calcular aproximadamente esta perda localizada, através de uma fórmula geral:

$$H_v = K * F * L * V^2 / 2g \quad (2)$$

Onde:

- H_v = perda de carga localizada;
- F = coeficiente de perda de carga distribuída, ou fator de atrito de Darcy;

- L = comprimento da tubulação;
- V = velocidade média do fluido;
- K = coeficiente determinado de forma empírica para cada tipo singular.

Podemos encontrar alguns casos na tabela 2 a seguir, os componentes de uma instalação e seus respectivos coeficientes de perda de carga K:

Componente de uma instalação	Coefficientes de perda de carga (k)
A. Curvas	
90° (raio normal), flangeada	0,3
90° (raio normal), rosqueada	1,5
90° (raio longo), flangeada	0,2
90° (raio longo), rosqueada	0,7
45° (raio longo), flangeada	0,2
45° (raio normal)	0,4
B. Retornos (curvas com 180°)	
Flangeados	0,2
Rosqueados	1,5
C. Tês	
Escoamento alinhado, flangeado	0,2
Escoamento alinhado, rosqueado	0,9
Escoamento derivado, flangeado	1,0
Escoamento derivado, rosqueado	2,0
D. União rosqueada	0,08
E. Válvulas	
Globo, totalmente aberta	10
Gaveta, totalmente aberta	0,15
Gaveta, ¼ aberta	0,26
Gaveta, ½ aberta	2,1
Gaveta, ¾ aberta	17
Retenção, escoamento a favor	2
Retenção, escoamento ao contrario	∞
Esfera, totalmente aberta	0,05

Esfera, 1/3 fechada	5,5
Esfera, 2/3 fechada	210

Tabela 2: Coeficientes para determinadas perdas de carga localizadas. [9]

2.7 Teorema de Bernoulli

O princípio de Bernoulli descreve o comportamento de um fluido movendo-se ao longo de uma linha de corrente e traduz para os fluidos, o princípio da conservação de energia. O teorema expressa que num fluido ideal (sem rugosidade nem atrito), em regime de circulação por um duto fechado, a energia que possui o fluido permanece constante ao longo do seu percurso. Essa energia pode ser dividida em três componentes:

1. Cinética – energia devido à velocidade que se encontra o fluido;
2. Potencial Gravitacional – energia devido à altura em que se encontra o fluido;
3. Energia de Fluxo – energia devido a pressão.

Embora não se verifique na prática o cumprimento das exigências para a aplicação do teorema de Bernoulli, pode-se, contudo, em cálculos preliminares ou numa primeira aproximação, adotá-lo até mesmo para correntes gradualmente variadas.

Para tal teorema, temos a equação geral de Bernoulli:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gh = \text{constante} \quad (3)$$

Porém, na maioria das aplicações que encontramos nas indústrias, tal fórmula não pode ser utilizada. Mais constantemente, utilizamos a equação de Bernoulli que consta o valor da perda de carga, para assim atender as condições de equilíbrio de energia no sistema aplicado em fluidos reais:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (4)$$

Onde, para as equações 3 e 4:

- $z =$ altura do ponto em questão em relação ao plano de referencia (m);

- $p = \text{pressão do ponto em questão} \left(Pa = \frac{N}{m^2} \right);$
- $\gamma = \text{peso específico do fluido} \left(\frac{N}{m^3} \right);$
- $v = \text{velocidade do fluido no ponto em questão} \left(\frac{m}{s} \right);$
- $g = \text{aceleração da gravidade} \left(\frac{m}{s^2} \right);$
- $\Delta H = H_2 - H_1 : \text{perda de carga entre os pontos em questão} (m).$

2.8 Turbina Hidráulica

As primeiras turbinas hidráulicas foram construídas na colônia romana de Chemtou, na atual Tunísia, no século IV d.C., para acionar moinhos. As primeiras turbinas modernas foram desenvolvidas na França e Inglaterra, no século XVIII, para substituir as rodas de pás como fonte de energia mecânica para fábricas. Nessa aplicação, as turbinas acionavam as máquinas de fábricas próximas, através de longos eixos ou correias. Desde o final do século XIX elas são usadas quase que exclusivamente para acionar geradores elétricos — quer isoladamente, em fazendas e outros locais isolados, quer agrupadas em usinas ou centrais hidrelétricas [10].

Existem dois tipos de turbinas hidráulicas: as de ação e as de reação. Tradicionalmente o uso de turbinas hidráulicas tem-se concentrado no tipo Pelton, com um ou mais jatos, no caso das máquinas de ação; e na Francis, Hélice e Kaplan, no caso do tipo de reação.

Na primeira, a energia hidráulica disponível é transformada em energia cinética, para depois de incidir nas pás do rotor, transformar-se em mecânica: tudo isto ocorre a pressão atmosférica. São conversores hidrodinâmicos que operam recebendo energia na forma mecânico-hidráulica e fornecendo na forma mecânico-motriz. Toda a energia potencial do aproveitamento, a menos das perdas na tomada d'água e nas canalizações de pressão e forçada, é transformada em energia cinética antes de chegar as conchas do rotor da turbina.

Já na turbina de reação, o rotor é completamente submerso na água, com o escoamento da água ocorre uma diminuição de pressão e de velocidade entre a entrada e a saída do rotor. As turbinas de reação são de dois tipos principais:

1. de escoamento radial ou misto
2. de escoamento axial

Dos tipos de escoamentos radiais predomina a turbina Francis (patenteada por Samuel Dowd e aperfeiçoada por James Bicheno Francis). As turbinas Dériaz são similares às turbinas Francis rápidas, mas com um mecanismo que permite variar a inclinação das pás do rotor. Os tipos principais de máquinas axiais são turbinas de hélice (Propeller) cujas pás do rotor são

fixas e as turbinas Kaplan com as pás do rotor ajustáveis. Outros tipos de máquinas axiais são as turbinas Tubulares, Bulbo e Straflo.

As turbinas hidráulicas, como todas as máquinas de fluxo, apresentam dois componentes mecânicos característicos: o rotor e o sistema distribuidor. É o rotor o principal responsável pela transmutação da energia de pressão e ou energia cinética em trabalho mecânico de rotação. O sistema distribuidor possui como função básica o direcionamento do fluido com o intuito de se otimizar o rendimento da turbina hidráulica.

2.8.1 Turbina Pelton

Nas turbinas Pelton, não há palhetas estáticas e sim um conjunto de bocais ou injetores, cada qual com uma agulha móvel (semelhante a uma válvula) para controlar a vazão. Nessas turbinas, a pressão da água é primeiro transformada em energia cinética pelo bocal, que acelera a água até uma alta velocidade. O jato d'água é dirigido para uma série de conchas curvas montadas em torno do rotor.

Turbinas Pelton trabalham com velocidades de rotação mais alta que os outros tipos. Elas são usualmente adequadas para operar entre quedas de 350 m até 1100 m, sendo por isto muito mais comuns em países montanhosos. Por outro lado, as conchas podem sofrer erosão pelo efeito abrasivo da areia misturada com a água, comum em rios de montanhas. Elas têm eficiência constante dentro de uma ampla gama de condições de operação.

Como toda turbina hidráulica, a Pelton possui um distribuidor e um receptor. As partes principais das turbinas Pelton são descritas a seguir:

- **Distribuidor:** O distribuidor é um bocal de forma apropriada a guiar a água, proporcionado um jato cilíndrico sobre a pá do receptor, o que é conseguido por meio de uma agulha;
- **Rotor:** O rotor consta de um certo número de pás com forma de concha especial, dispostas na periferia de um disco que gira preso a um eixo. A pá possui um gume médio, que fica sobre o plano médio da roda, e que divide simetricamente o jato e o desvia lateralmente.
- **Defletor de jato.** O defletor intercepta o jato, desviando-o das pás, quando ocorre uma diminuição violenta na potência demandada pela rede de energia. Nessa hipótese, uma atuação rápida da agulha para reduzir a descarga poderia vir a provocar uma sobre pressão no bocal, nas válvulas e ao longo do encanamento adutor. O defletor volta à sua posição inicial liberando a passagem

do jato, logo que a agulha assume a posição que convém, para a descarga correspondente à potência absorvida.

- **Bocal de frenagem:** O bocal de frenagem faz incidir um jato nas costas das pás, contrariando o sentido de rotação, quando se desejar frear a turbina rapidamente.

As turbinas Pelton são do tipo tangenciais e de ação parcial como visto no item anterior. Quanto ao número de jatos, as turbinas Pelton podem ser de um, dois, quatro ou seis jatos e, excepcionalmente, de 3 jatos. Quanto maior o número de jatos maior a potência para uma mesma queda, maior o desgaste por abrasão se a água tiver areia em suspensão e menor o tamanho do rotor (o que representa uma redução no custo por unidade de potência instalada). A incidência de jatos sobre o rotor em cada volta depende do número de jatos, de modo que, quanto maior a queda, menor deverá ser o número de impactos sobre a pá por minuto.

Abaixo, podemos encontrar um rotor (figura 14) e os principais componentes (figura 15), de uma turbina Pelton:

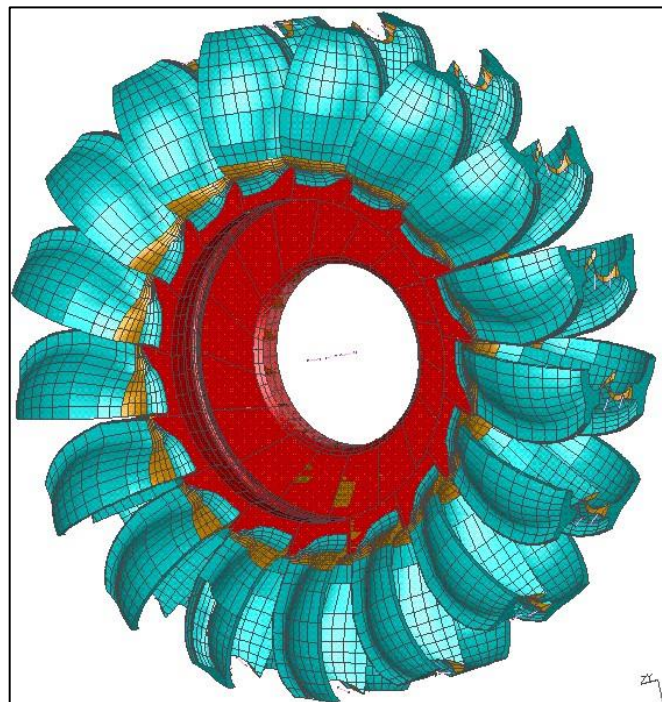


Figura 14: Rotor Pelton [11].

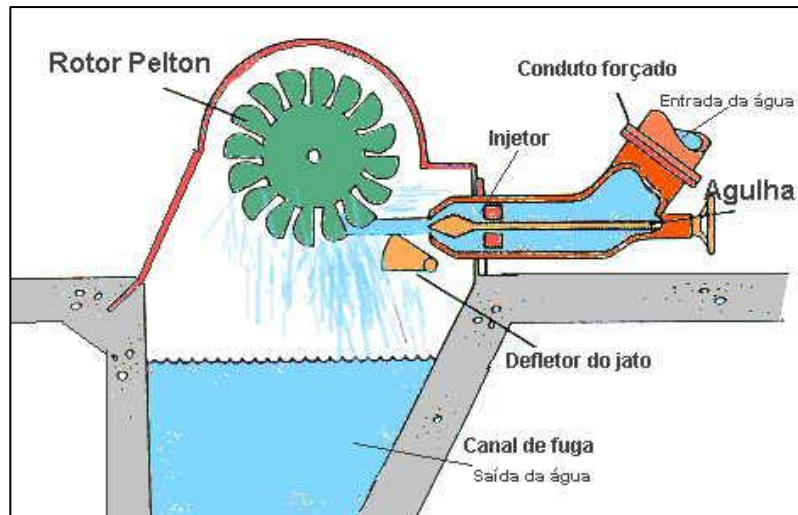


Figura 15: Principais componentes de uma Turbina Pelton – 1 jato[11].

2.8.2 Turbina Francis

Em 1847 o inglês James Bicheno Francis (1815-1892) trabalhando nos EUA melhorou uma máquina de escoamento centrípeta desenvolvida em 1838 por Samuel Dowd (1804-1879), de modo que a partir disso, elas receberam o nome de turbinas Francis.

As turbinas Francis são máquinas de reação do tipo ação total (a água ao passar pelo rotor preenche simultaneamente todos os canais das pás). Quanto ao posicionamento do eixo podem ser:

- Eixo vertical;
- Eixo horizontal.

Quanto às velocidades do rotor, as turbinas Francis podem ser:

- Lentíssimas ($55 < n_s < 70$ rpm);
- Lentas ($70 < n_s < 120$ rpm);
- Normais ($120 < n_s < 200$ rpm);
- Rápidas (ou Deriaz) ($200 < n_s < 300$);
- Extra rápidas ou ultrarrápidas ($300 < n_s < 450$).

Quanto ao modo de instalação que caracteriza como recebem a água motriz, as turbinas Francis podem ser:

- **Instalação aberta:** Quando a turbina é colocada num poço, ao qual vem ter a água conduzida em um canal de adução, havendo geralmente uma comporta ou adufa para que se possa esvaziá-la na manutenção. Este tipo de instalação é conveniente apenas para pequenas quedas (até 10 m) e potências pequenas (algumas centenas de CV). Vale ressaltar que quando a descarga é grande e o desnível é pequeno, há vantagem de se utilizar um tubo de sucção curvo.
- **Instalação fechada:** Quando a queda é superior a 10 metros é preferível colocar a turbina numa caixa à qual vem ter a água conduzida em uma tubulação forçada. Estas caixas tem a forma de caracol, voluta ou espiral e são envolvidas pelo concreto armado.

Esse tipo de turbina possui um rotor na forma de um cilindro vazado com a parede lateral formada por palhetas curvas. A água de entrada é dirigida por um tubo em espiral e um sistema de palhetas estáticas que a forçam a atravessar radialmente a parede do rotor, empurrando as palhetas deste. A água sai pela base do rotor praticamente com pressão e velocidade muito reduzidas.

Possui pré-distribuidor e distribuidor. O pré-distribuidor é um conjunto de pás fixas, responsável por dar um ângulo de entrada para a água, aumentando o rendimento. O distribuidor é um conjunto de pás móveis, responsável pelo controle da quantidade de água que entra no rotor, assim variando a potência gerada.

Turbinas Francis são usualmente adequadas para operar entre quedas de 40 m até 400 m. A Usina hidrelétrica de Itaipu assim como a Usina hidrelétrica de Tucuruí, Furnas e outras no Brasil funcionam com turbinas tipo Francis com cerca de 100 m de queda d'água.

Nas figuras abaixo, podemos encontrar os principais componentes (figura 16), a velocidade do fluxo (figura 17) e a ação das pás (figura 18) em um rotor de uma turbina Francis:

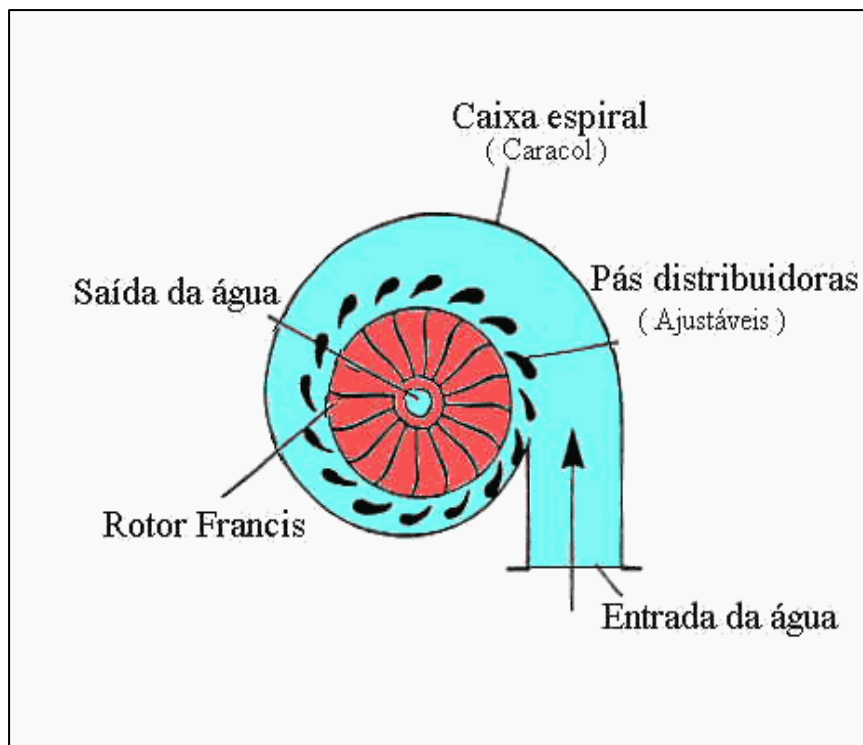


Figura 16: Principais componentes de um rotor Francis [11].

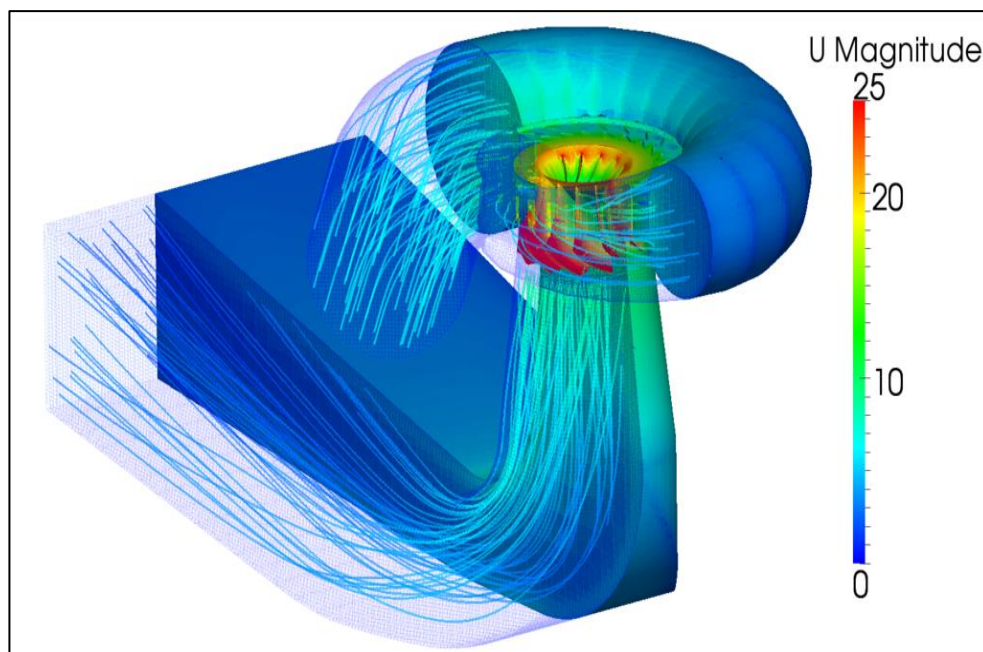


Figura 17: Velocidade do fluxo em uma turbina Francis [12].

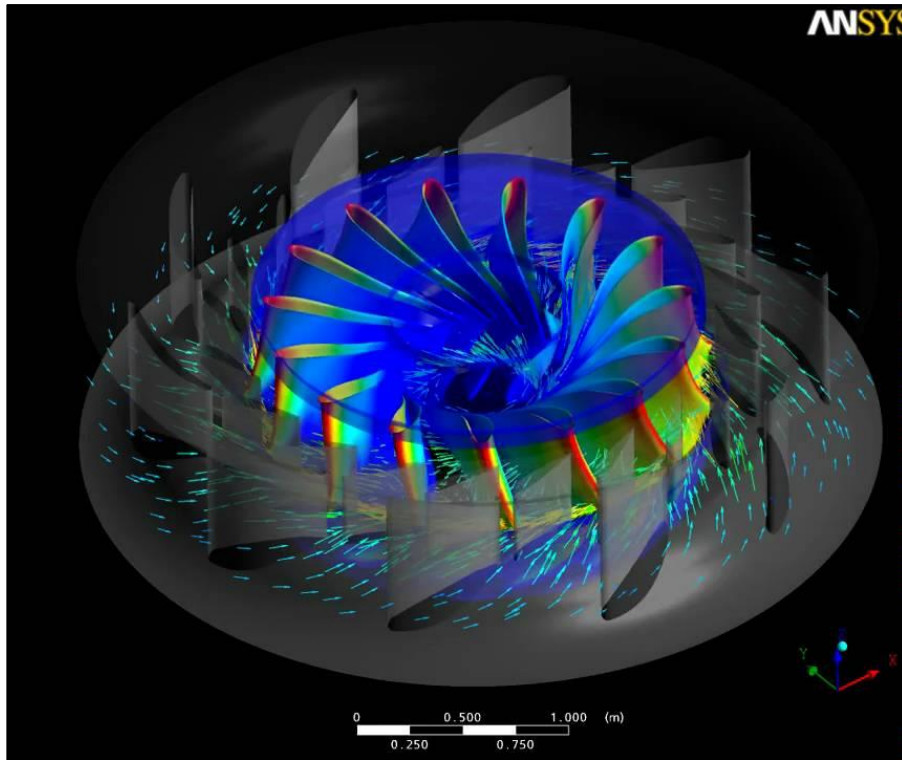


Figura 18: Ação das pás sob o fluido dentro de uma turbina Francis [12].

2.9 Monoetanolamina (MEA)

Monoetanolamina (MEA) é a mais simples das etanolaminas e resulta da reação de amônia com óxido de eteno. Reagindo-se MEA com óxido de eteno, obtém-se DIETANOLAMINA (DEA) e, a partir desta, adicionando-se mais óxido de eteno, TRIETANOLAMINA (TEA).

Monoetanolamina, dietanolamina e trietanolamina são pouco voláteis à temperatura ambiente. Higroscópicas, podem apresentar-se na forma sólida ou líquida, dependendo da temperatura e do grau de pureza. Atuam, principalmente, como agentes alcalinizantes e inibidores de corrosão. Abaixo, é mostrado na figura 19, a reação para obtenção da MEA:

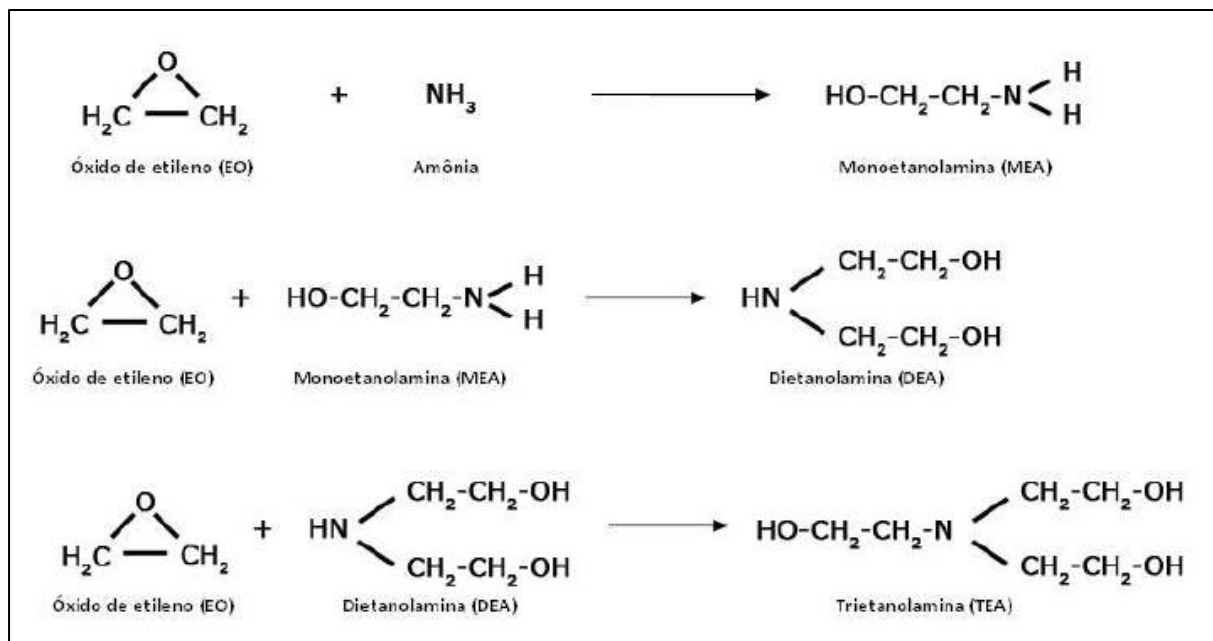


Figura 19: Reação para obtenção da Monoetanolamina [13].

As etanolaminas tem ganhado cada vez mais espaço no mercado, pois podem ser aplicadas em diversas áreas, tais como:

- Tintas e vernizes;
- Agroquímico;
- Cosméticos;
- Detergentes;
- Aditivos para cimento;
- Tratamento de gases;
- Outras aplicações.

Para aplicação do projeto, a Monoetanolamina é utilizada no tratamento de gases. As etanolaminas podem ser utilizadas no tratamento de gases naturais e gás residual de petróleo na absorção do dióxido de carbono. Monoetanolamina pode ser empregada como absorvedor seletivo de dióxido de carbono. Dietanolamina é recomendada para o tratamento de vapores com alto teor de ácido sulfídrico.

Etanolaminas são importantes na produção de amônia, dióxido de carbono líquido e gelo seco, que podem ser recicladas para uso após processo de regeneração térmica.

No processo em questão do projeto, a MEA tem a composição conforme mostrado na tabela 3 a seguir:

Componente	CASRN	Concentração
Monoetanolamina	141-43-5	>99,0%
Dietanolamina	111-42-2	<0,2%

Tabela 3: Composição da MEA utilizada no processo [14].

A MEA também pode ser chamada de aminoetanol ou hidroxietilamina. Ela possui uma aparência clara, de um líquido limpo, pouco viscoso e pouco volátil, com um odor ligeiramente amoniacal. Solúvel com água em todas as proporções e na maioria dos álcoois e polióis (álcool contendo múltiplos grupos hidroxila).

Monoetanolamina possui um peso específico a 20° C de 1,0179, muito próximo ao da água à também 20°C. Por isso, para efeitos de cálculo neste projeto, iremos utilizar as propriedades da água.

Na tabela 4 a seguir, podemos encontrar mais algumas propriedades importantes da MEA utilizada no processo de remoção de gás carbônico da corrente de etano U-5100, conforme boletim técnico fornecido pela empresa Oxiteno:

	MEA
Aparência a 25°C	Líquido
Cor Pt-Co a 25°C (máximo)	15
Densidade 20/20°C	1,019
Densidade 30/20°C	-
Água, %p (máximo)	0,1
Ponto de congelamento, °C (aprox.)	10,5
Pureza, %p (mínimo)	99,2
Peso molecular médio, g/mol	61
Ponto de ebulição, °C	170
Ponto de fulgor em vaso aberto, °C	93

Tabela 4: Propriedades informativas da MEA [13].

Capítulo 3

Cálculos e Desenvolvimento do Projeto

Nesta seção serão abordados os cálculos que foram necessários para o desenvolvimento do projeto: cálculo de perda de carga, cálculo da seleção da turbina e cálculo da avaliação do investimento necessário para aplicação do projeto.

3.1 Cálculo de Perda de Carga

Para aplicação deste projeto, necessita-se avaliar a perda de carga que ocorre desde o início do processo de remoção do gás carbônico do etano (T-510001), até a válvula 5100-LV-004.

Avaliando a planta do processo acima citado, juntamente com a análise no próprio local, foi verificado a presença dos seguintes pontos a serem relevados no cálculo:

- Curva de 90° flangeada;
- Válvulas de gaveta;
- Curva 180° flangeada;
- Permutador;
- Comprimento da tubulação;
- Tipo de material da tubulação;
- Tipo de fluido;
- Vazão do projeto;
- Diâmetro da tubulação;
- Altura de instalação da válvula 5100-LV-004.

Conforme apresentado no capítulo anterior, será utilizado os dados de coeficientes de perda de carga localizada na tabela 2 e de [15]. Conforme explicito na tabela 4, as propriedades do fluido são similares ao da água, logo utilizaremos [9] para propriedades físicas do fluido nos cálculos abaixo.

DATASHEET LV-5100004			
Tag N°		LV-5100004	
Serviço		MEA rica para o topo da T-510002	
P&ID N°		TJT-104	
Diametro da Linha	Classe da linha	8" (0,2032m)	Mb
Nome do Fluido		MEA rica	
Estado do fluido		Liquido	
Vazão máxima	Vazão mínima	158,03 m ³ /h	79,01 m ³ /h
Pressão normal		22,3 Kgf/cm ² (2,19MPa)	
Temperatura normal		95 °C	
Diferencial de pressão normal		21,4 Kgf/cm ² (2,10MPa)	
Tipo CV		Válvula globo (gaiola) com pressão balanceada	

Tabela 5: Parte do datasheet válvula 5100-LV-004 [Anexo 1].

A vazão Q utilizada nos cálculos, foi baseada em [1] e no datasheet da válvula 5100-LV-004 (tabela 5):

Dados do cálculo:

- Vazão: $Q = 150 \frac{m^3}{h} = 0,042 \frac{m^3}{s}$;
- Diâmetro da tubulação: $D = 8" = 0,2032m$;
- Comprimento da tubulação: $l = 98m$;
- Altura de referência: $Z1 = 0$;
- Altura da válvula 5100 – LV – 004: $Z2 = 20m$;
- Pressão inicial na torre T – 510001: $P1 = 25 \frac{kg}{cm^2}$;
- Densidade do fluido a 50°C: $\rho1 = 988 \frac{kg}{m^3}$;
- Densidade do fluido a 90°C: $\rho2 = 965 \frac{kg}{m^3}$;
- Viscosidade dinâmica a 50°C: $\mu1 = 5,486 E - 4$;
- Viscosidade dinâmica a 90°C: $\mu2 = 3,147 E - 4$;
- Velocidade do fluido: $v = \frac{Q}{A} = 1,29 \frac{m}{s}$;

- *Rugosidade equivalente do aço comercial: $\varepsilon = 0,045\text{mm}$.*

Utilizando o método de Bernoulli através da fórmula (4) para encontrar a pressão que chega na válvula, e adotando $v_1 = v_2$, utiliza-se a equação:

$$P_2 = \left[\left(\frac{P_1}{\gamma} \right) - (Z_2 + \Delta H) \right] * \gamma \quad (5)$$

Para calcular o ΔH , utiliza-se a seguinte equação:

$$\Delta H = \frac{v^2}{2g} * (f * \frac{l}{D} + \sum K) \quad (6)$$

O valor de f (*perdas distribuídas*) foi encontrado pelo diagrama de Moody (figura 13). Para isso, foi necessário o cálculo do número de Reynolds através da fórmula (1) para o fluido a 50°C (antes do permutador) e a 90°C (após o permutador):

$$Re = 474.500 - \text{para fluido a } 50^\circ\text{C}$$

$$Re = 803.792 - \text{para fluido a } 90^\circ\text{C}$$

Com o número de Reynolds já calculado, necessita-se agora calcular a rugosidade do material da tubulação do processo, utilizando dados de [9]:

$$E = \frac{\varepsilon}{D} = 0,000221$$

Com esses valores, descobrimos os valores para f de 0,016 para fluido a 90°C e 0,017 para fluido a 50°C . Para efeito de cálculo, foi utilizado $f = 0,017$.

Para encontrar o valor da perda de carga localizada, utiliza-se os seguintes coeficientes de perda, de acordo com a tabela 2 e com [15]:

- $K_1 = 19 \text{ curvas de } 90^\circ \text{ flangeadas} = 19 * 0,2 = 3,8;$
- $K_2 = 7 \text{ válvulas gaveta aberta} = 7 * 0,15 = 1,05;$
- $K_3 = 2 \text{ curvas de } 180^\circ \text{ flangeadas} = 2 * 0,2 = 0,4;$
- $K_4 = 2 \text{ entradas nos bocais do feixe do permutador} = 2 * 2,75 = 5,5;$

- $K5 = 2 \text{ saídas nos bocais do feixe do permutador} = 2 * 2,75 = 5,5;$
- $K6 = 2 \text{ curvas de } 180^\circ \text{ nos permutadores} = 2 * 0,4 = 0,8.$

Logo, $\sum K = K1 + K2 + K3 + K4 + K5 + K6 = 17,05.$

Com todos os valores já conhecidos, foi calculado o valor da perda de carga total, utilizando a fórmula (6), que é igual a:

$$\Delta H = 2,14 \text{ m.}$$

Voltando na fórmula (5), achou-se a pressão na válvula:

$$P2 = 22,36 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,19 \text{ MPa}$$

Os manômetros situados próximos a instalação da válvula 5100-LV-004, indicam uma pressão próxima de 22,00 kgf/cm² (2,16 MPa) e o manual de operação [1], diz que a pressão de chegada na válvula é de aproximadamente 22,3 kgf/cm² (2,19 MPa). Dessa maneira foi possível ter uma comparação/verificação do cálculo de perda de carga.

3.2 Seleção de turbina-gerador

No cálculo de perda de carga, foi verificado que a pressão que chega na válvula 5100-LV-004 é 22,3 kg/cm² (2,19 MPa). De acordo com [1], após passar pela válvula, o fluido precisa estar com uma pressão de 0,9 kg/cm² (0,09 MPa), pois é a pressão de operação do fluido na torre de regeneração seguinte, T-5100002.

Essa grande variação de pressão atualmente é feita através de uma válvula globo gaiola (5100-LV-004), a qual é empregada normalmente nas industriais para controle de diferenciais de pressão tão elevados como o estudado no projeto. A energia que não é aproveitada atualmente pela válvula, atua comprimindo uma mola.

Como o ΔP é elevado, essa válvula sofre muito desgaste e com isso necessita de bastante atenção e manutenção para manter o seu funcionamento, e por isso é considerada a válvula mais crítica do processo.

Nas figuras abaixo, podemos ver a válvula em uma instalação industrial (figura 20) e o interior desgastado da válvula 5100-LV-004 (figura 21):



Figura 20: Válvula 5100-LV-004 (cortesia Petrobras)



Figura 21: Desgaste no Interior da Válvula Globo Gaiola (cortesia Petrobras)

A ideia do projeto é validar a redução de perda de carga ou troca dessa válvula de controle em questão por uma turbina hidráulica, para com isso obter um reaproveitamento de energia que será enviado para a subestação de energia da própria unidade.

Como visto na revisão bibliográfica, turbinas hidráulicas podem ser divididas em dois tipos principais: ação e reação. Para o projeto, necessita-se que a montante receba os 22,3 kg/cm² (2,19 MPa) calculados acima, e a jusante libere 0,9 kg/cm² (0,09 MPa) para a continuidade do processo.

A variação de pressão de 21,4 kg/cm² (2,1 MPa) equivale, para cálculos de reaproveitamento de energia, à uma queda d'água de 214 metros.

Para encontrar o tipo de turbina de reação adequado para este projeto, calcula-se o salto energético específico (Y), potência hidráulica da turbina (Ph), potência no eixo (Pe), e a velocidade específica (nqa). Dados:

- $Q = 0,042 \frac{m^3}{s}$;
- $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$;
- *frequência: $f = 60 \text{ Hz}$ (mais usual no Brasil);*
- $\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$;
- $H = 214 \text{ m}$.

$$\text{Salto energético específico: } Y = H * g = 214 * 9,81 = 2099,34 \frac{J}{kg};$$

$$\text{Potência hidráulica: } Ph = Q * \rho * Y = 0,042 * 998 * 2099,34 = 87,99 \text{ KW};$$

De acordo com catálogos de orientações, pode-se adotar o rendimento total da turbina, $nt = 0,85$. Com isso, calcula-se a potência no eixo ou eficaz como feito na fórmula abaixo:

$$\text{Potência eficaz: } Pe = nt * Ph = 0,85 * 87,99 = 74,79 \text{ KW}$$

A partir dos cálculos acima, buscou-se encontrar alguma turbina no mercado que satisfizesse a necessidade do projeto. Porém, ao verificar com fornecedores e tabelas de operação de seus produtos, não foi encontrada uma turbina que trabalhasse com uma vazão

baixa como a do projeto ($Q = 0,042 \text{ m}^3/\text{s}$) e uma elevada altura de cabeça de água $H = 214\text{m}$.

A solução para viabilizar a instalação de uma turbina, foi reduzir a altura de queda da água para $H = 100\text{m}$. Diante disso, o restante da quebra de pressão continuaria a ser realizado na válvula 5100-LV-004. A seguir apresentaremos os novos cálculos para a seleção da turbina.

Dados:

- $Q = 0,042 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$;
- $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$;
- *frequência: $f = 60 \text{ Hz}$ (mais usual no Brasil);*
- $\rho = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;
- $H = 100 \text{ m}$.

$$\text{Salto energético específico: } Y = H * g = 100 * 9,81 = 981 \frac{\text{J}}{\text{kg}};$$

$$\text{Potência hidráulica: } Ph = Q * \rho * Y = 0,042 * 998 * 981 = 41,12 \text{ KW};$$

$$\text{Potência eficaz: } Pe = \eta * Ph = 0,85 * 41,12 = 34,95 \text{ KW}$$

Utilizando o valor de potência eficaz $Pe = 34,95 \text{ KW}$ e a vazão $Q = 0,042 \text{ m}^3/\text{s}$, adotamos o número de rotações por minuto $n = 1200$ para dar continuidade na escolha da turbina ideal para o projeto.

Através da empresa Zhenjiang Nengyuan Hydraulic Technology Co. LTD, foi encontrado uma tabela para referência na escolha do conjunto turbina-gerador, abaixo na tabela 6:

DATA SHEET NENGYUAN HYDRO				
Nome	Potencia (KW)	Cabeça da agua(m)	Vazão (m ³ /s)	Velocidade (RPM)
Turbina de fluxo radial	2 KW	4 – 15	0,008 – 0,025	1500/1000
	2 KW	8 – 30	0,005 – 0,019	1500/1000
	3 KW	10 – 25	0,011 – 0,036	1500/1000
	3 KW	12 – 40	0,005 – 0,019	1500/1000
	3 KW	25 – 60	0,003 – 0,008	1500/1000
	5 KW	8 – 25	0,014 – 0,04	1500/1000
	5 KW	12 – 35	0,008 – 0,03	1500/1000
	8 KW	20 – 60	0,008 – 0,035	1500/1000
	8 KW	10 – 25	0,016 – 0,055	1500/1000
	15 KW	12 – 50	0,016 – 0,055	1500/1000
	20 KW	12 – 60	0,025 – 0,15	1500/1000
	40 KW	20 – 100	0,01 – 0,25	1500/1000
	100 KW	30 - 100	0,05 – 0,25	1500/1000
Turbina de fluxo misto	3 KW	4,5 – 8	0,025 – 0,055	1500/1000
	5 KW	5 – 12	0,027 – 0,082	1500/1000
	8 KW	5 – 12	0,055 – 0,125	1500/1000
	10 KW	6 – 12	0,055 – 0,126	1500/1000
	15 KW	8 – 15	0,08 – 0,2	1500/1000
	15 KW	8 – 35	0,02 – 0,14	1500/1000
Tipo pressão axial	3 KW	1 – 2,5	0,075 – 0,15	1500/1000
	3 KW	2,5 – 3,5	0,10 – 0,18	1500/1000
	5 KW	3,5 – 5	0,11 – 0,21	1500/1000
	8 KW	4 - 8	0,11 – 0,22	1500/1000

Tabela 6: Resumo do data sheet turbinas Nengyuan Hydro [17]

Para encontrar a velocidade específica nqa , foi usado a fórmula abaixo de acordo com [7], utilizando o n em metros por segundo:

$$nqa = n * \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{Y^3}} * 10^3 = 23,38$$

Buscando os valores ideais do gerador que trabalhará acoplado à turbina, utiliza-se o valor de n acima calculado, para encontrar o número de polos p do gerador. Utilizaremos a fórmula abaixo de acordo com [2]:

$$n = 120 * \frac{f}{p}$$

Logo, o gerador com a frequência de 60Hz deverá ter 6 polos.

Como já é sabido, toda máquina possui um rendimento mecânico atrelado à sua potência. De acordo com [16], tal rendimento pode ser considerado entre 0,92 e 0,98. Para efeito de cálculo, utilizamos o rendimento ng de 0,95 para se obter a potência nominal a ser gerada através da fórmula abaixo:

$$P_n = P_e * ng = 34,95 * 0,95 = 33,20 \text{ KW}$$

- **Parâmetros para seleção de turbinas:**

MODO DE OPERAR	VELOCIDADE ESPECÍFICA (RPM)	TIPO DE TURBINA	QUEDA D'AGUA
A	Até 18 rpm	Pelton 1 injetor	Até 800 m
A	18 a 25 rpm	Pelton 1 injetor	400 a 800 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 1 injetor	100 a 400 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 2 injetores	400 a 800 m
A	36 a 50 rpm	Pelton 2 injetores	100 a 400 m
A	51 a 72 rpm	Pelton 4 injetores	100 a 400 m
R	55 a 70 rpm	Francis Lentíssima	200 a 400 m
R	70 a 120 rpm	Francis Lenta	100 a 200 m
R	120 a 200 rpm	Francis Média	50 a 100 m
R	200 a 300 rpm	Francis Veloz	25 a 50 m
R	300 a 450 rpm	Francis Velocíssima	15 a 25 m
R	400 a 500 rpm	Hélice Veloz	Até 15 m

R	270 a 500 rpm	Kaplan Lenta	15 a 50 m
R	500 a 800 rpm	Kaplan Veloz	05 a 15 m
R	800 a 1100 rpm	Kaplan Velocíssima	Até 05 m

Tabela 7: Tabela auxiliar para seleção de turbina de ação ou reação [11]

Utilizando todos os dados e cálculos acima, e confrontando com a tabela anterior (tabela 7), foi selecionado um conjunto turbina-gerador do tipo Francis, pois para atender ao requisito do projeto, se faz necessário a utilização de uma turbina de reação, pois nem a montante e nem a jusante irá trabalhar sob pressão atmosférica. Com isso, foi escolhida a turbina Francis lenta, pois é a que tem a menor velocidade específica, e atende à altura de trabalho referente à variação de pressão do projeto.

Na busca por um fornecedor que atendesse às novas necessidades do projeto, foi encontrada a empresa Zhenjiang Nengyuan Hydraulic Technology Co. LTD. Esta, é uma empresa chinesa, situada na cidade de Zhenjiang. Abaixo, segue algumas das principais características do conjunto turbina-gerador na imagem 22 e 23[17]:

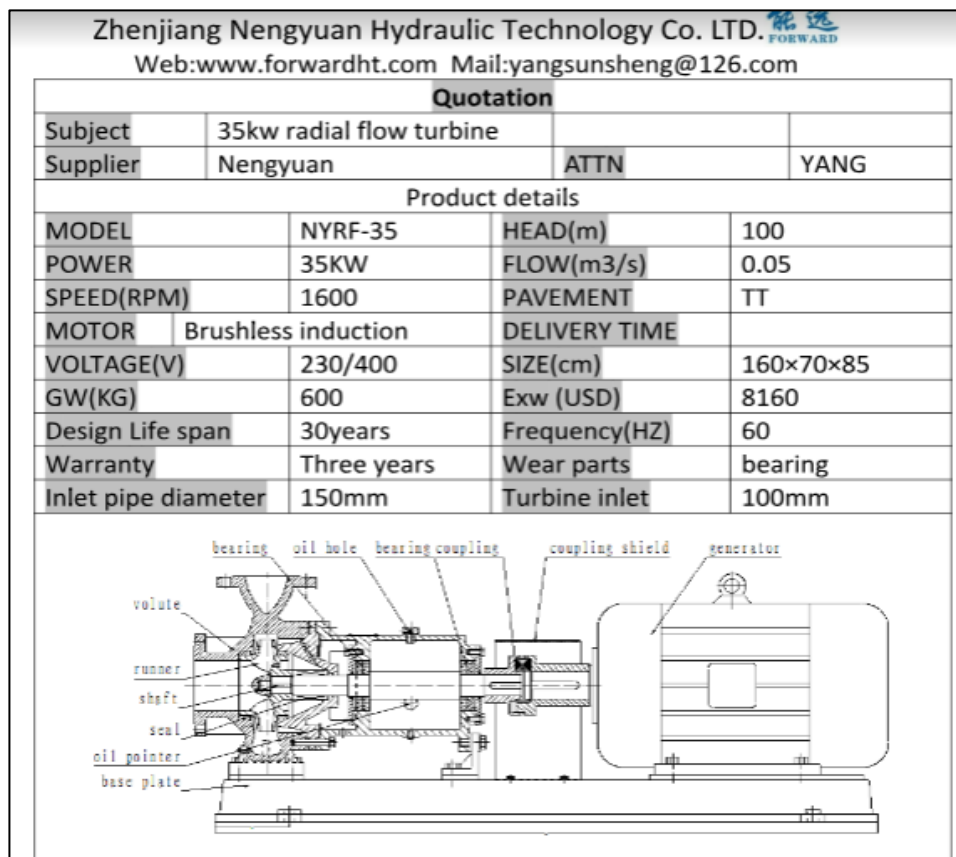


Figura 22: Orçamento e características do conjunto turbina-gerador escolhido [17]



Figura 23: Conjunto turbina-gerador selecionado [17]

3.3 Cálculo de viabilidade da instalação

Para toda implantação de projeto, é necessário um prévio estudo da viabilidade do mesmo. Com os dados que temos da turbina-gerador e com uma estimativa das adaptações e serviços para implantação do mesmo, foi possível a realização do cálculo de payback do projeto, que é basicamente uma análise em cima dos valores a ser investido versus o tempo que levará para ter o retorno do mesmo.

$$P_n = 33,20 \text{ KW}$$

*Geração mensal de energia da turbina = $P_n * n^\circ \text{ de dias do mes} * \text{horas de trabalho}$*

$$\text{Geração mensal de energia da turbina} = 33,20 * 30 * 24 = 23904 \text{ KW/mes}$$

A partir da tabela de conta de luz da Light, foi possível analisar o quanto de ganho financeiro a turbina acrescenta para o processo. A light tem uma divisão para o valor de consumo, onde o horário ponta é o período do dia de maior utilização de energia (de 17:30 as 20:30, exceto sábado, domingo e feriados). Levando em consideração um mês, o horário de ponta corresponde a cerca de 8,33% ao tempo total de trabalho da turbina.

$$\text{energia mesal fora ponta} = 91,67\% * 23904 * \text{composte encargo kWh fora ponta}$$

$$\text{energia mesal fora ponta} = 91,67\% * 23904 * 0,16175768$$

$$\text{energia mesal fora ponta} = R\$ 3.544,43$$

$$\text{energia mesal ponta} = 8,33\% * 23904 * \text{composte encargo kWh ponta}$$

$$\text{energia mesal fora ponta} = 3,33\% * 23904 * 1,39297883$$

$$\text{energia mesal ponta} = R\$ 2.773,70$$

O ganho financeiro mensal da instalação da turbina é **R\$ 6.318,13**.

A seguir será apresentado os custos para a realização do projeto, adotando 1 dólar = 3,65 reais:

$$\text{Turbina} + \text{gerador} = US \$8160 = 8160 * 3,65 = R\$ 29.784,00$$

$$\text{Taxa de exportação} = US \$260 = 260 * 3,65 = R\$ 949,00$$

A quantidade de tubulação estimada para adequação do projeto foi de 5 metros de tubulação de 8". A tubulação pesa 65,53 kg e o quilo do aço custa aproximadamente R\$ 3,00, logo:

$$65,53 \times 3 = R\$ 196,59$$

Como a REDUC apresenta funcionários aptos para a realização da instalação de todos os equipamentos (turbina, gerador, tubulação etc.), o custo de instalação seria relativamente baixo e não foi levado em consideração.

A unidade de remoção de gás carbônico (U-5100) trabalha em paralelo com uma unidade de projeto idêntico (U-3500). Ou seja, o processamento do etano não iria ser interrompido/reduzido pois a U-3500 teria a capacidade para processar todo o etano proveniente da U-5000 e U-2600.

Logo, o custo total para a instalação da turbina foi **R\$ 30.929,59**

A partir dos cálculos acima, foi possível prever o tempo mínimo para que o investimento para implantação do projeto seria recuperado: payback em aproximadamente **5 meses**.

Vale destacar, que o projeto foi feito com o intuito de obter a maior viabilidade possível para a aplicação do mesmo, utilizando um fornecedor de turbinas que atendesse nossa necessidade de uma forma menos complexa, sem a necessidade de projetar todas as partes de uma turbina para adaptar a nossa necessidade. Além disso, foi utilizado nos cálculos, a mão de obra interna da empresa. Uma mão de obra externa, especializada em instalação de turbinas, pode ser a forma ideal para tal, porém como o objetivo era minimizar os custos e consequentemente melhorar a viabilidade, foi utilizada a mão de obra da Petrobras.

Capítulo 4

Conclusão

O intuito do projeto foi a otimização da energia gerada pela quebra de pressão em uma válvula de controle na unidade de remoção de gás carbônico da corrente de etano situado na refinaria de Duque de Caxias (REDUC). Em muitas unidades de processamento de petróleo apresentam quebras de pressão elevadas, onde na maioria das vezes não são reaproveitadas.

No caso deste trabalho, foi estudado como é o funcionamento das duas plantas do projeto CGPEX. A U-5100 teve uma maior atenção pois foi dentro do seu processo que houve a instalação da turbina-gerador.

Através de cálculos de perda de carga e consulta ao manual de operação da unidade, foi verificado a pressão de entrada e a pressão de saída da válvula 5100-LV-004. Inicialmente o objetivo era exercer toda a quebra de pressão na turbina e, com isso, a remoção da válvula de controle. Realizando consultas a fornecedores e livros voltados para seleção de turbina identificou-se uma grande dificuldade de construir uma turbina do tipo Francis com a vazão baixa e altura de cabeça da água que iria possuir.

Junto a empresa Zhenjiang Nengyuan Hydraulic Technology Co., verificou a possibilidade de projetar uma turbina tipo Francis mantendo a vazão e com uma queda de pressão menor (aproximadamente metade da quebra de pressão). Dessa maneira, para se tornar possível o projeto, a válvula 5100-LV-004 foi mantida no processo com uma diferencial de pressão menor.

Por fim, após a seleção da turbina, foi visto a viabilidade financeira para a construção/aplicação da turbina-gerador na U-5100. Como a máquina tem uma vida útil de 30 anos e em menos de um ano de operação já estaria tendo retorno financeiro, pode-se concluir que é viável o aproveitamento do diferencial de pressão para a geração de energia elétrica.

Capítulo 5

Sugestões para trabalhos futuros

Com o trabalho realizado foi possível analisar diversas questões as quais precisam ser melhor estudadas para o projeto de uma turbina-gerador e outras formas de otimização de energia principalmente na indústria de petróleo. Como sugestões para trabalhos futuros é possível citar:

- Analisar em uma refinaria de petróleo a quantidade de energia que não é aproveitada em grandes diferenças de pressões;
- O projeto conseguiu aproveitar apenas cerca de 50% do diferencial de pressão na 5100-LV-004. Estudar outras opções de recuperação de energia a fim de melhorar esse desempenho;
- Dimensionar mais detalhadamente os equipamentos internos de um conjunto turbina-gerador. No trabalho foi calculado os principais parâmetros para a seleção de uma turbina, e através do contato com um fornecedor, foi feita a seleção da turbina.

Referências bibliográficas

- [1] KANG, N.W.; Manual de Operação U5000 – 5100, Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] MASSULINI, S.A. Elementos **Finais de Controle**. Paraná: UTEP, 2014. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/rafaelcbruno1/valvulas-de-instrumenta>
- [3] SAMPAIO, F.S. **Válvulas de controle tipo globo**. São Paulo: DHM Automação, 2013. Disponível em: <http://www.dhmautomacao.com.br/artigos/2.pdf>
- [4] GLOBE CAGE-GUIDED CONTROL VALVES from Kentintrol: banco de dados. Disponível em: <https://kentintrol.com/wp-content/uploads/2018/02/KKI-Series-1200-and-7200.pdf> Acesso em: 19/04/2018
- [5] MACINTYRE, Archibald Joseph. Bombas e instalações de bombeamento. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1997.
- [6] MACINTYRE, Archibald Joseph. Máquinas motrizes hidráulicas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.
- [7] SOUZA, Zulcy de. Dimensionamento de máquinas de fluxo: turbinas, bombas, ventiladores. São Paulo: E. Blücher, 1991.
- [8] VÁLVULAS E POSICIONADORES from AI&CP: banco de dados. Disponível em: <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/3-6-pc3b3s-pucpr-7-vc3a1lvulas-e-posicionadores.pdf> Acesso em 17/04/2018.
- [9] MUNSON, B.R., YOUNG, D.F., OKIISHI, T.H., Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Ed. Edgard Blucher, Tradução da 4ª edição americana, 2002.
- [10] TURBINA HIDRÁULICA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em:

https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Turbina_hidr%C3%A1ulica&oldid=50512889

Acesso em: 18 nov. 2017

[11] PEA 2420: PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA from USP: banco de dados. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=24453> Acesso em: 01/05/2018

[12] FILLO, N; FRIDSMA, K; HECKER, C. **Francis Turbine**. Colorado: Colostate, 2015. Disponível em: [www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/CIVE%20401/projects%202015/Francis%20Turbines%20\(1\).pdf](http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/CIVE%20401/projects%202015/Francis%20Turbines%20(1).pdf)

[13] BOLETIM TECNICO ETANOLAMINAS, from OXITENO, banco de dados. Disponível em: <http://oxiteno2.tempsite.ws/wp-content/uploads/2017/11/catalogo-petroleo-e-gas.pdf> Acesso em: 17/05/2018

[14] FICHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUIMICOS, from DOW BRASIL, banco de dados. Disponível em: <https://www.dow.com/pt-br/polyurethane/markets/industrial-use-materials> Acesso em: 17/05/2018

[15] SILVA, Tadeu H. Mecânica dos Fluidos e Fenômenos de Transporte. 4ª edição. Belo Horizonte: FUMARC, 1996.

[16] COGO, J.R; ALMEIDA, A.T.L; BERNARDES, D.F; **Rendimento de Geradores para microcentrais hidrelétricas**. Minas Gerais: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986. Disponível em: [http://www.gsiconsultoria.com.br/publicacoes_gsi/08%20-%20ART459-07%20\(Rendimento%20de%20Geradores\).pdf](http://www.gsiconsultoria.com.br/publicacoes_gsi/08%20-%20ART459-07%20(Rendimento%20de%20Geradores).pdf) Acesso em: 25/05/2018

[17] MINI HIDRO TURBINA FRANCIS, from ZHENJIANG NENGYUAN, banco de dados. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/10kw-factory-price-brushless-induction-mixed-flow-turbine-francis-turbine--60614634212.html?spm=a2700.8699010.29.111.1a8d27864PkdJA> Acesso em: 27/05/2018

[18] SILVA, A.L; **Instalações Industriais**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2018. Disponível em: <http://engenhariamecanicaaulas.blogspot.com/> Acesso em: 03/06/2018

[19] POLITICA DE RH DA PETROBRAS, fonte: Site público da Petrobras. Disponível em: <https://acordocoletivo.org/2009/06/06/politica-de-rh-da-petrobras/>. Acesso em 20/06/18.

ANEXO 1 – Data sheet válvula 5100-LV-004

Tag No.	(Quantity)		LV-5100004 (1)		
Service	RICH MEA TO T-510002 TOP				
P&ID No.	TJT-104				
Line Size	Line Class		8"	Mb	
Fluid Name	RICH MEA				
Fluid State	L				
Flow	Max.	158.03			
	Nor.Vap.	Nor.Liq.	158.03		
	Min.	79.01			
	Unit	m3/h			
Pressure	Min.	Nor.	Max.	23	22.3 22.3
	Unit	kgf/cm2g			
Temperature	Min.	Nor.	Max.	95	
	Unit	degC			
Diff.Press.	Min.	Nor.	Max.	22.1	21.4 21.4
	Shut-off	28.2			
	Unit	kgf/cm2			
Viscosity.	Vap.	Liq.	0.31		
	Unit	cP			
MW					
CP/CV	Z	1.2		0.992	
Solid%					
Sp.Gr.	0.91				
Flash%	0.19				
Flash MW	26.5				
Vap. Pressure	0.79		kgf/cm2a		
Crit.Pressure	212		kgf/cm2a		
CV Type	Globe Valve (Cage) Press. Balance				
Trim Characteristic	Linear				
Body Size X Trim Size	3"		X 3"		
Flow Direction	Flow to Open				
Connect.Style	Flanged				
Connect.Rating	ANSI300Lb RF				
Body Material	A351.CF8				
Trim Material	316LSS				
Hardening	STEEL				
On Air Failure	Close				
Seat Tightness	Class-IV				
Stroke Time	Open	Close			
Mech.Design(Press.)	28.2		kgf/cm2g		
Mech.Design(Temp.)	125		degC		
Required Cv	Min.	Nor.	Max.	18.728	38.384 38.384
Rated Cv	65				
Actuator	Diaphragm				
Positioner	E/P Positioner				
Signal	4-20 mADC				
Explosion-proof	Ex (d)				

ANEXO 2 – Fluxogramas U-5100

