

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

**ESTUDO DO ACIONAMENTO DE BOMBAS  
CENTRÍFUGAS POR MEIO DE DVR's E  
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E  
ECONÔMICA (EVTE) EM UMA UNIDADE DE  
COQUEAMENTO RETARDADO**

Dyogo Sgambato Roberto  
Fabrine da Silva dos Santos

Prof. Orientador: José Paulo Vogel  
Prof<sup>as</sup>. Coorientadoras: Gisele Vieira  
Ilda Spritzer

**Rio de Janeiro  
Maio/2014**

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

**ESTUDO DO ACIONAMENTO DE BOMBAS  
CENTRÍFUGAS POR MEIO DE DVR's E  
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E  
ECONÔMICA (EVTE) EM UMA UNIDADE DE  
COQUEAMENTO RETARDADO**

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: José Paulo Vogel  
Prof<sup>as</sup>. Coorientadoras: Gisele Vieira  
Ilda Spritzer

**Rio de Janeiro**

**Maiο/2014**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R639 Roberto, Dyogo Sgambato

Estudo do acionamento de bombas centrífugas por meio de DVR's e análise de viabilidade técnica e econômica (EVTE) em uma unidade de coqueamento retardado / Dyogo Sgambato Roberto [e] Fabrine da Silva dos Santos.—2014.

xv, 57f. + apêndice e anexo : il.color. , graf. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2014.

Bibliografia : f.56-57

Orientador : José Paulo Vogel

Coorientadoras : Gisele Vieira e Ilda Spritzer

1. Bombas centrífugas. 2. Velocidade. 3. Estudos de viabilidade. I. Santos, Fabrine da Silva dos. II. Vogel, José Paulo (Orient.). III. Vieira, Gisele (Coorient.). IV. Spritzer, Ilda (Coorient.). V. Título.

CDD 621.6

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me instruir e iluminar o caminho correto a ser seguido.

Agradeço aos meus pais Maria Regina Sgambato e Ataíde Cordeiro Roberto todo esforço, dedicação e apoio incondicional aos meus estudos, mesmo diante muitas das vezes de tamanha dificuldade, lutaram e batalharam sempre como leões por mim e meus irmãos, buscando sempre a formação de cidadãos cultos, educados e de bom caráter. Sendo assim, afirmo que para minha pessoa, existem três Deuses na Terra!

Agradeço aos meus irmãos Isaura e Fabinho pela amizade e união que temos entre nós, caso raro entre muitas famílias hoje em dia, além de agradecer também as lições dadas por todos esses anos de vida. Quando eu pedia vocês me davam, emprestavam. Hoje eu ainda peço e vocês continuam me dando e emprestando, sempre com muita boa vontade e sem egoísmo. O caçula cresceu e com esta grande vitória venho em busca do meu lugar no Mundo, sempre me espelhando em vocês, grandes engenheiros.

Agradeço a minha noiva Viviane Rosa pelo grande incentivo, paciência e carinho durante períodos tensos na Faculdade. O amor dessa baixinha me deu força, coragem e muita confiança para encarar cada período vivido dentro da Faculdade. Estarei sempre ao seu lado, te amo.

Agradeço a Fabrine Santos, por tamanho companheirismo durante grande parte da Faculdade, nada mais justo do que fechar um ciclo ao lado desta grande amiga, que nas horas mais tensas conseguia transmitir toda sua calma e paciência.

Ao professor José Paulo Vogel e as professoras Gisele Vieira e Ilda Spritzer pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta monografia.

Agradeço aos Engenheiros Pedro Henrique de Almeida Barbosa, Mauro Faria Ramos e Enio Von Haehling Lima, por nos fornecerem informações e materiais para a elaboração desse projeto.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia.

Aos amigos e colegas, principalmente Leonardo de Souza por proporcionar tamanha descontração e irmandade por todos esses anos vividos na Instituição e Klaus Itai sempre disponível para ajudar, incentivar e apoiar.

**Dyogo Sgambato Roberto**

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais Maria Elizete e Paulo Roberto, meus irmãos Fabrício e Fabiano e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Agradeço ao meu namorado Washington Luis pela paciência e compreensão durante esse período de nervosismo, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades.

Agradeço ao Dyogo Sgambato, sua família e noiva por me “aturarem” durante os finais de semana de desenvolvimento desse projeto, sempre com muito carinho.

Ao professor José Paulo Vogel e as professoras Gisele Vieira e Ilda Spritzer pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta monografia.

Agradeço aos Engenheiros Pedro Henrique de Almeida Barbosa, Mauro Faria Ramos e Enio Von Haehling Lima, por nos fornecerem informações e materiais para a elaboração desse projeto.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

**Fabrine da Silva dos Santos**

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma proposta inicial de estudo e análise de viabilidade técnica-econômica no acionamento de bombas centrífugas por meio de variadores de velocidade em uma Unidade de Coqueamento Retardado. O Coque Verde de Petróleo (CVP) oriundo de algumas refinarias apresenta baixo teor de enxofre, o que lhe confere maior valor no mercado e menor impacto ambiental durante sua aplicação. Além disso, possui elevado teor de carbono fixo, baixo teor de cinzas, elevado poder calorífico e alta estabilidade química. É também um produto insolúvel em água, não explosivo, não reativo e que apresenta um alto ponto de ignição. Em diversos tipos de refinarias é comum o uso de dezenas ou até mesmo centenas de bombas centrífugas para os mais diversos fins. A implantação de variadores de velocidade em bombas centrífugas pode propiciar uma significativa redução no consumo energético. No entanto, diversos cuidados devem ser tomados de forma a garantir a viabilidade técnica-econômica de um projeto de implantação de um variador de velocidade em uma bomba centrífuga industrial. Neste projeto serão estimados os ganhos ou perdas decorrentes da implantação de um variador de velocidade em uma bomba centrífuga, tendo como objetivo principal a análise de um projeto que seja viável do ponto de vista técnico-econômico, levando em consideração, ganhos em confiabilidade, eficiência, emissão de gases poluentes e economia de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Bombas centrífugas, variadores de velocidade, viabilidade técnica-econômica.

## ABSTRACT

The project presents an initial proposal for the study and analysis of technical and economic viability on the drive centrifugal pumps with variable speed in a Delayed Coking Unit. The Green Petroleum Coke come from some refineries presents low sulfur content that gives it more market value and less environmental impact during its application. Moreover, it have high fixed carbon content, low ashes content, high calorific power and high chemical stability. It's also a water-insoluble product, non-explosive, non-reactive and that presents a high ignition point. In many types of refineries is common the use tens or even hundreds of centrifugal pumps for various purposes. The implementation of variables speed in centrifugal pumps can provide a significant reduction in energy consumption. However, many care should be taken to ensure the technical and economic viability of a project to implementation of a variable speed industrial centrifugal pump. In this project will be estimated gains or losses resulting from the implementation of a variable speed in a centrifugal pump, having as main objective the analysis of a project that is viable from a technical and economic perspective, taking into account, gains in reliability, efficiency, gas pollutant emission and saving electricity and electrical energy economy.

**Key-words:** Centrifugal pumps, variables speed, technical and economic viability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Bomba Centrífuga.....	4
FIGURA 02 – Funcionamento da bomba centrífuga com carcaça em voluta.....	5
FIGURA 03 – Funcionamento da bomba centrífuga com carcaça com pás difusoras...5	5
FIGURA 04 – Bombas radiais (a), axiais (b) e fluxo misto (c).....	6
FIGURA 05 – Sistema de bombeamento.....	7
FIGURA 06 – Curva do sistema.....	8
FIGURA 07 – Curva tipo Rising.....	10
FIGURA 08 – Curva tipo Drooping.....	10
FIGURA 09 – Curva tipo Steep.....	11
FIGURA 10 – Curva tipo Flat.....	11
FIGURA 11 – Curva tipo Instável.....	12
FIGURA 12 – Curva de potência consumida de uma bomba de fluxo misto.....	14
FIGURA 13 – Curva de potência consumida de uma bomba de fluxo radial.....	14
FIGURA 14 – Curva de potência consumida de uma bomba de fluxo axial.....	15
FIGURA 15 – Sistema com carga estática nula.....	17
FIGURA 16 – Sistema com fator de carga igual a 20%.....	17
FIGURA 17 – Sistema com fator de carga igual a 80%.....	18
FIGURA 18 – Ponto de Operação.....	18
FIGURA 19 – Variação da curva do sistema por abertura/fechamento parcial da válvula de descarga.....	19
FIGURA 20 – Curvas de isoefficiência apresentadas com curvas de bombas de diferentes diâmetros do rotor.....	20
FIGURA 21 – Variação da curva da bomba através da variação da rotação.....	21
FIGURA 22 – Curva de isoefficiência da bomba utilizando as leis de semelhança.....	22
FIGURA 23 – Sistema com válvulas de controle instaladas na linha.....	23
FIGURA 24 – Válvula instalada na recirculação do sistema.....	24
FIGURA 25 – Acoplador de velocidade variável modelo R17K450M da VOITH.....	26
FIGURA 26 – Variadores com engrenagens mecânicas.....	26
FIGURA 27 – Ponto Crítico.....	27
FIGURA 28 – Situação onde a associação de VC com DVR torna-se obrigatória.....	27
FIGURA 29 – Finos de coque extraído no Processo de Coqueamento retardado.....	28

FIGURA 30 – Unidade de coqueamento com 4 reatores.....	32
FIGURA 31 – Sistema completo de uma Unidade de Coqueamento Retardado.....	33
FIGURA 32 – Região crítica para o estudo de viabilidade técnica-econômica.....	34
FIGURA 33 – Esquemático do processo de descoqueamento em um intervalo de 48 horas.....	35
FIGURA 34 – Esquemático das bombas b-1 e b-2.....	37
FIGURA 35 – Esquemático da bomba b-3.....	37
FIGURA 36 – Esquemática da bomba B-0 (Jet Pump).....	38
FIGURA 37 – Curvas características da bomba B-0.....	42
FIGURA38 – Conjunto motor + multiplicador de velocidade + bomba.....	44
FIGURA 39 – Esquemático da bomba B-0 no sistema proposto.....	45
FIGURA 40 – Curva característica da bomba e Curvas do Sistema com válvula de controle restringida e 100% aberta.....	47
FIGURA 41 – Curvas de isorendimento.....	48
FIGURA 42 – Esquemático de funcionamento do sistema atual e proposto.....	49
FIGURA 43 – Fluxo de caixa do investimento do sistema proposto.....	53

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 01 – Perda de carga.....	6
EQUAÇÃO 02 – Perda de carga, método do comprimento equivalente.....	6
EQUAÇÃO 03 – Altura manométrica de sucção.....	7
EQUAÇÃO 04 – Altura Manométrica de Descarga.....	7
EQUAÇÃO 05 – Altura Manométrica Total.....	7
EQUAÇÃO 06 – Altura estática do sistema.....	9
EQUAÇÃO 07 – Altura dinâmica do sistema.....	9
EQUAÇÃO 08 – Energia Positiva de Sucção.....	12
EQUAÇÃO 09 – Potência hidráulica.....	15
EQUAÇÃO 10 – Rendimento da bomba.....	15
EQUAÇÃO 11 – Vazão proporcional à rotação.....	20
EQUAÇÃO 12 – Altura manométrica varia com o quadrado da rotação.....	20
EQUAÇÃO 13 – Potência absorvida varia com o cubo da rotação.....	21
EQUAÇÃO 14 – Velocidade de rotação do motor.....	24
EQUAÇÃO 15 – Potência fornecida à bomba.....	25
EQUAÇÃO 16 – Redução percentual dos custos de manutenção.....	40
EQUAÇÃO 17 – Potência hidráulica fornecida ao fluido.....	41
EQUAÇÃO 18 – potência elétrica fornecida ao motor.....	41
EQUAÇÃO 19 – Carregamento do motor.....	41
EQUAÇÃO 20 – Estimativa de rendimento do motor.....	41
EQUAÇÃO 21 – Energia total consumida pelo motor no sistema atual.....	42
EQUAÇÃO 22 – Energia total consumida pelo motor no sistema novo.....	45
EQUAÇÃO 23 – altura estática do sistema.....	46

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Tempos de operação dos Reatores de Coque A/B/C/D.....	36
TABELA 02 – Condições operacionais da bomba B-0 (Jet Pumps).....	38
TABELA 03 – Acionamento da bomba B-0.....	39
TABELA 04 – Histórico de paralizações na bomba B-0.....	40
TABELA 05 – Valores operacionais relacionados às diferentes vazões da bomba B-0... .....	43
TABELA 06 – Consumo energético da bomba B-0.....	43
TABELA 07 – Rendimento da bomba no sistema proposto.....	48
TABELA 08 – Consumo energético do novo sistema.....	49
TABELA 09 – Variação do custo de implantação.....	54

## **LISTA DE ABREVIações**

UCR – Unidade de Coqueamento Retardado.

DVR – Variador de rotação.

EVTE – Estudo de viabilidade técnica-econômica.

NPSH – Net Positive Suction Head (Energia Positiva de Sucção).

VC – Válvula de Controle.

RV – Rotação Variável.

CVP – Coque Verde de Petróleo.

GLP – Gás liquefeito de petróleo.

BTE – Baixo teor de enxofre.

ATE – Alto teor de enxofre.

TQC – Tanque de água clara.

MTBF – Tempo médio entre falhas.

AMTs – alturas manométricas totais.

ATM – Taxa de atratividade anual.

CSLL – Contribuição social sobre o lucro líquido.

VPL – Valor presente líquido.

TIR – Taxa interna de retorno.

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Simbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidade</b>
$h_f$	Perda de carga	m
$h_{fn}$	Perda de carga normal	m
$h_{fl}$	Perda de carga localizada	m
$Q$	Vazão	m <sup>3</sup> /h
$D$	Diâmetro da tubulação	m
$L$	Comprimento da tubulação (trecho reto + comprimento equivalente dos acessórios – Tabelas 1)	m
$F$	Coefficiente de atrito e pode ser obtido através dos Anexos 01 e 02 (Ábaco de Moody)	-
$h_s$	Altura manométrica de sucção	m
$Z_s$	Altura estática de sucção	m
$P_s$	Pressão manométrica no reservatório de sucção	mca
$h_{fs}$	Perda de carga na linha e acessórios de sucção	m
$\Gamma$	Peso específico do fluido	Kgf/m <sup>3</sup>
$h_d$	Altura manométrica de descarga	m
$Z_d$	Altura estática de descarga	m
$P_d$	Pressão manométrica no reservatório de descarga	mca
$h_{fd}$	Perda de carga na linha e acessório de descarga	m
$H$	Altura manométrica total	m
$H_e$	Altura estática do sistema	m
$H_d$	Altura dinâmica do sistema	m
$K$	Constante de proporcionalidade que está relacionada à energia a ser fornecida pela bomba ao fluido para que o mesmo seja bombeado até o seu destino	-
$NPSH_{disp}$	Net Positive Suction Head (Energia Positiva de Sucção) disponível	mca
$P_{rs}$	Pressão no reservatório de sucção em metros de coluna d'água	mca
$P_{atm}$	Pressão atmosférica no local	mca

$p_v$	Pressão de vapor do líquido à temperatura de	mca
$\Delta P_s$	Somatório das perdas de carga na sucção	mca
$H_{geos}$	Altura geométrica de sucção (negativa ou positiva)	m
$P$	Potência consumida	W
$P_h$	Potência hidráulica	W
$\eta_b$	Rendimento da bomba	-
$H$	Eficiência hidráulica	-
$P_{ot.e}$	Potência no eixo do motor	W
$P_{ot.H}$	Potência hidráulica	W
$P_{ot.D}$	Potência destrutiva	W
$f_{H0}$	Fator de carga estática	-
$Q_1$	Vazão na nova rotação	m <sup>3</sup> /s
$N$	Rotação conhecida	rpm
$N_1$	Nova rotação	rpm
$H_1$	Altura manométrica na nova rotação	rpm
$P_1$	Potência na nova rotação	W
$N$	Velocidade de rotação do motor	rpm
$P$	Números de polos do motor	-
$F$	Frequência da corrente elétrica	Hz
$S$	Escorregamento do motor	-
$P_m$	Potência elétrica do motor	W
$C$	Conjugado do motor	-
$\omega$	Velocidade angular no eixo	Rad/s
$P_{el}$	Potência elétrica fornecida ao motor	W
$\Gamma$	Carregamento do motor	%
$P_{nom}$	Potência nominal do motor	W
$\eta_{50}$	Rendimento do motor a 50% de carga	-
$\eta_{100}$	Rendimento do motor a 100% da carga (nominal)	-
$\Delta t$	Intervalo de tempo em que foi fornecida a potência elétrica	horas
$\eta_{var}$	Rendimento do variador de rotação	-

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo.....	2
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
2.1. Fundamentação Teórica.....	4
2.1.1. Bombas Centrífugas.....	4
2.1.1.1. Fundamentos Hidráulicos.....	6
2.1.1.2. Princípios de Funcionamento.....	9
2.1.2. Cálculo de Potência Consumida pela Bomba.....	15
2.1.3. Fator de Carga Estática.....	16
2.1.4. Ponto de Operação do Sistema.....	18
2.1.5. Modificação da Curva do Sistema.....	19
2.1.6. Eficiência das Bombas para Rotação Constante.....	20
2.1.7. Efeito da Mudança de Rotação da Bomba.....	20
2.1.8. Eficiência das Bombas para Variação de Rotação.....	21
2.2. Controle de Vazão Usando Válvula de Controle.....	22
2.2.1. Válvula de Controle Instalada na Linha do Sistema.....	22
2.2.2. Válvula de Controle Instalado na Recirculação do Fluido.....	23
2.3. Controle de Vazão por Variadores de Velocidade.....	24
2.4. Princípio de Funcionamento dos DVR's.....	24
2.4.1. Vantagens dos Variadores de velocidade.....	25
2.5. Variadores Mecânicos.....	25
2.5.1. Projeto e Funcionamento.....	25
2.6. Situação Onde a Associação de VC com DVR torna-se Obrigatória.....	27
<b>3. Descrição do Sistema de Coqueamento Retardado.....</b>	<b>28</b>
3.1. Coque Verde de Petróleo.....	28
3.2. Fundamento do Processo de Coqueamento Retardado.....	29
3.3. Etapas de Realização do Processo de Descoqueamento.....	29
3.3.1. Enchimento.....	29
3.3.2. Purga com Vapor.....	29
3.3.3. Resfriamento.....	29

3.3.4. Drenagem.....	30
3.3.5. Abertura dos Flanges.....	30
3.3.6. Descoqueamento.....	30
3.3.7. Remontagem dos Flanges.....	31
3.3.8. Purga com Vapor e Teste de Estanqueidade.....	31
3.3.9. Aquecimento.....	31
3.4. Descrição do Sistema Estudado.....	32
3.4.1. Descrição do Sistema Atual.....	33
3.4.2. Característica do Sistema Atual (Simplificado).....	37
3.4.3. Acionamento da Bomba B-0 (Jet Pimp).....	39
3.4.4. Problemas e Deficiências no Processo Atual.....	39
3.4.5. Equações para Determinação do Gasto Energético do Sistema Atual.....	41
3.4.6. Curvas Características da Bomba B-0.....	42
3.4.7. Descrição do Sistema Proposto.....	44
3.4.7.1. Critérios para Abertura das Válvulas de Controle.....	45
3.4.8. Cálculo do Consumo Energético do Sistema Proposto.....	45
3.4.8.1. Altura Manométrica (H).....	46
3.4.8.2. Rendimento da Bomba ( $\eta_b$ ).....	47
3.4.8.3. Rendimento do Variador de Rotação ( $\eta_{var}$ ).....	48
<b>4. Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica.....</b>	<b>51</b>
4.1. Características em Ganhos Técnicos.....	51
4.2. Características Utilizadas para Análise do Investimento.....	51
4.3. Análise de Retorno sobre o Investimento Proposto.....	52
4.4. Análise da Variação do Custo de Implantação.....	53
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>55</b>
<b>6. Bibliografia.....</b>	<b>56</b>
<b>7. Apêndice.....</b>	<b>58</b>
7.1. Sumário.....	59
<b>8. Anexo.....</b>	<b>60</b>
8.1. Sumário.....	61

# Capítulo 1

## 1. Introdução

Processos industriais são sistemas que dependem de condições operacionais específicas (pressão, temperatura, vazão,...) para funcionarem adequadamente. Essas condições precisam ser monitoradas e controladas a fim de se obter especificações corretas dos produtos de saída do processo.

Diante deste contexto, as bombas centrífugas industriais têm como função principal fornecer energia a um fluido, de modo a elevá-lo, por meio de conversão de energia mecânica em energia cinética (movimento) através de motores (combustão ou elétrico) ou turbinas. Sendo assim, pode-se definir um bombeamento como sendo o ato de se adicionar energia a um fluido com o intuito de movê-lo de um ponto para outro.

A utilização de variadores de velocidade vem ganhando espaço no acionamento de sistemas de bombeamento. A prática do uso de variadores mecânicos tende a ser mais flexível, ou seja, alguns processos são bastante dinâmicos, como por exemplo, o processo de descoqueamento em Reatores nas UCRs e exigem diferentes condições operacionais ao longo do tempo. Bombas que operam sem variação de velocidade em seu acionamento, contudo, são incapazes de controlar a vazão do processo.

Existem duas maneiras de contornar o problema:

- Inclusão de válvula de controle no processo para alterar a vazão (modificação das condições do sistema);
- Modificação no mecanismo de acionamento da bomba, possibilitando variação da velocidade de rotação e, por consequência, da sua vazão (modificação das características da bomba).

Em diversos tipos de indústrias, sobretudo as petroquímicas, é comum o uso frequente de bombas centrífugas para os mais diversos fins, algumas das quais de elevada potência e de uso contínuo. A implantação de variadores de velocidade em bombas com características de controlar a vazão bombeada por meio da variação da rotação na bomba, ao

invés do uso de recirculação de fluido ou do uso de válvulas de controle na linha do sistema, poderá propiciar uma significativa redução nos gastos de energia, além de também poder aumentar a vida útil dos equipamentos. Projetos diante dessa metodologia, caso mostrem-se viáveis economicamente, poderão estimular as empresas a investir neste tipo de acionamento, diminuindo significativamente seu gasto energético, seus custos com manutenção e as emissões de gases poluentes, e abrindo novas oportunidades para empresas de engenharia especialistas neste tipo de projeto.

### **1.1. Objetivo**

Para este projeto tem-se como objetivo principal o estudo de viabilidade técnica-econômica na utilização de um DVR aplicado em uma bomba centrífuga para o sistema de descoqueamento em uma Unidade de Coqueamento Retardado. Sendo assim, este projeto tem o objetivo de estimar os ganhos ou perdas decorrentes e analisar a viabilidade técnica-econômica de um projeto que propõe a implantação de um variador mecânico em uma bomba centrífuga industrial, adequando assim, um conjunto (motor + DVR + bomba) próprio para a operação neste sistema, formulando e validando uma metodologia de cálculos e seleções para o conjunto estudado em aplicações sem e com o DVR, analisando-se criticamente os resultados obtidos de forma a concluir sobre a viabilidade ou não de implantação do projeto proposto.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

O presente projeto de fim de curso tem como característica principal a análise de viabilidade técnica-econômica no acionamento de bombas centrífugas por meio de DVR's (variadores de rotação) em uma Unidade de Coqueamento Retardado. De acordo com o Balanço Energético Nacional Brasileiro (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2009), os sistemas com equipamentos motrizes são responsáveis por mais de 60% do consumo de eletricidade na indústria. Segundo BRANCO (2009), "A energia elétrica representa a forma de energia mais utilizada na atualidade, e sua conservação tem sido motivo de preocupação entre usuários, em especial os do tipo industrial".

Quando se trata de mudanças das variáveis de processo, no entanto, nem sempre é feita da forma mais eficiente possível, seja pela falta de espaço identificada nas plantas, pela falta de tecnologia para o aumento do rendimento ou pelo alto custo de implantação da mesma.

Nas Refinarias muitas das vezes existe a necessidade de variar a vazão dos fluidos em um sistema de bombeio, para isso o método mais utilizado são as válvulas de controle, que consiste na variação da perda de carga nas linhas do sistema, concretizando-se assim, um método menos eficiente quando se comparado ao uso de variadores de velocidade nas bombas. O uso de DVR's, comparado ao uso de válvulas, tem como característica principal atuar sempre na mesma curva do sistema de operação, ou seja, ele não altera a curva de sistema original. Um fator ruim de alterar a curva de sistema original, como na utilização de válvulas de controle, é interferir em fatores de operações primordiais, como o aumento da pressão de descarga.

Será apresentado estudo baseado na teoria clássica das bombas, como fundamentos hidráulicos e princípios de funcionamento das bombas, apresentados em DE MATTOS e DE FALCO (1998). As informações sobre as características do conjunto motor-bomba a ser avaliado serão obtidas a partir da documentação técnica fornecida pelos fabricantes dos equipamentos.

Na elaboração da análise técnica-econômica serão demonstrados os ganhos com a substituição de válvulas de controle por DVR's em bombas centrífugas, não somente apresentando uma solução interessante sob o ponto de vista energético, mas também sob o

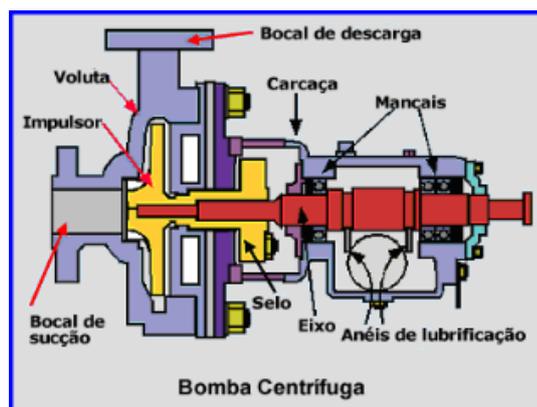
ponto de vista técnico e econômico. Sendo assim, tendo foco à preservação do equipamento, das peças, do sistema em geral (tubulações, flanges, válvulas), garantindo uma maior vida útil para o conjunto motor-bomba, além de análises de potência absorvida pelo equipamento, de custos e levantamento de lucros gerados diante desses processos.

Para o desenvolvimento deste projeto serão utilizados livros, artigos, catálogos de fornecedores de equipamentos (motores elétricos e variadores de velocidade), documentações técnicas, softwares para seleção de bombas e análise de viabilidade econômica, a fim de se obter informações sobre sistema de bombeio, conjunto motor-bomba e auxiliar no EVTE (estudo de viabilidade técnica-econômica).

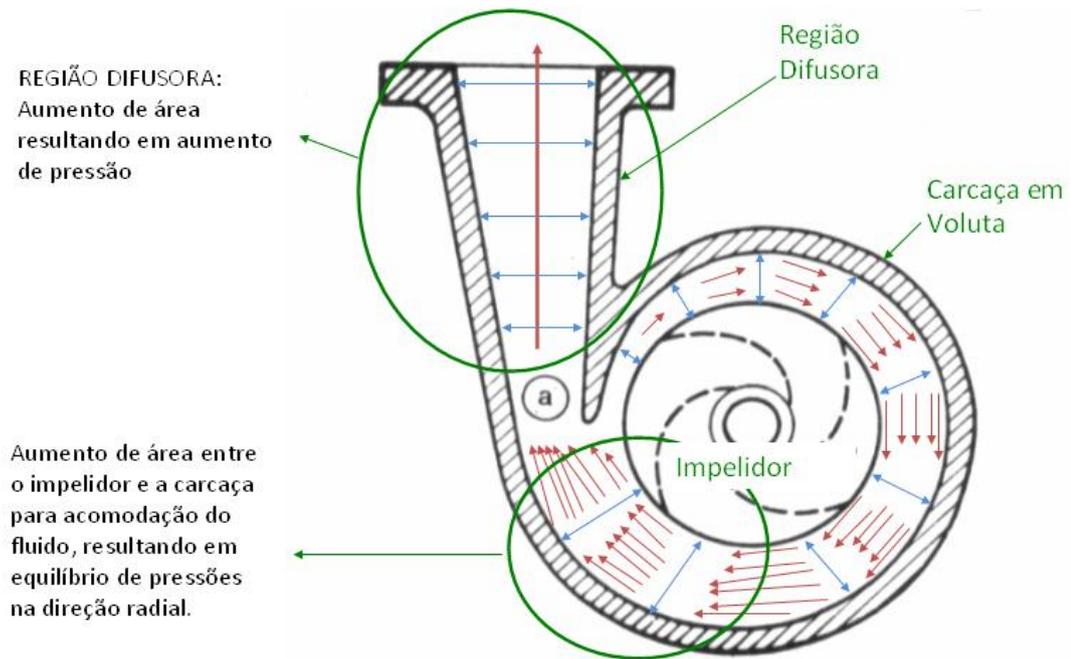
## 2.1. Fundamentação Teórica

### 2.1.1. Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas possuem como principal funcionamento a conversão de energia cinética fornecida ao líquido, em energia de pressão. Este tipo de conversão é realizado quando o fluido ao sair do impelidor passa em um conduto de área crescente (voluta), tendo assim, um aumento de energia de pressão em sua descarga.



**Figura 01** – Bomba Centrífuga. [4]

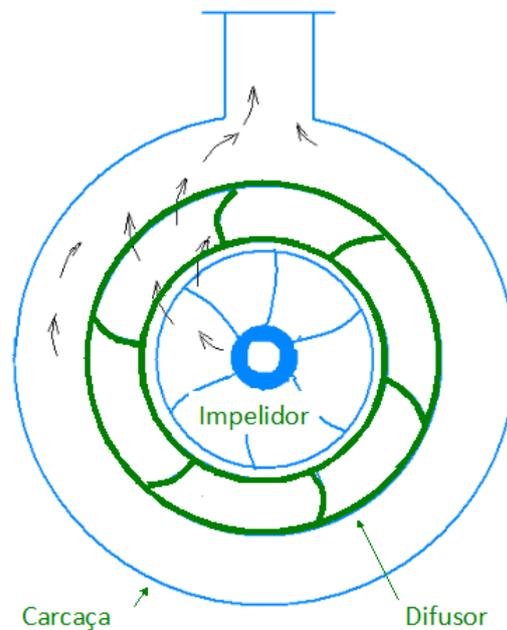


**Figura 02** – Funcionamento da bomba centrífuga com carcaça em voluta. [4]

#### • Difusor

- Peça fixada na carcaça e concêntrica com o rotor.
- Possui canais difusores que recebem o fluido saindo em alta velocidade do rotor.
- O fluido na saída do difusor perde velocidade e ganha pressão.

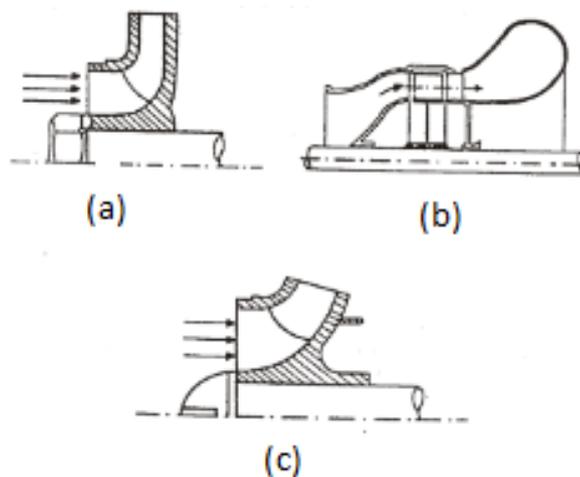
➤ Este arranjo tem aplicação usual em bombas do tipo **multiestágios para alta pressão**; por exemplo para transferência de óleo e injeção de água. Proporciona equilíbrio de pressão radial.



**Figura 03** – Funcionamento da bomba centrífuga com carcaça com pás difusoras. [4]

As bombas Centrífugas podem ser divididas em função dos tipos e modelos distintos dos rotores, perante a classificação a seguir:

- Radiais ou Puras: Quando a direção do fluido bombeado é perpendicular ao eixo de rotação.
- Fluxo Axial: Quando a direção do fluido bombeado é paralela em relação ao eixo de rotação.
- Fluxo misto: Quando a direção do fluido bombeado é inclinada em relação ao eixo de rotação.



**Figura 04** – Bombas radiais (a), axiais (b) e fluxo misto (c). [4]

### 2.1.1.1. Fundamentos Hidráulicos

- Perda de carga

$$h_f = h_{fn} + h_{fL}$$

**Equação 01:** Perda de carga.

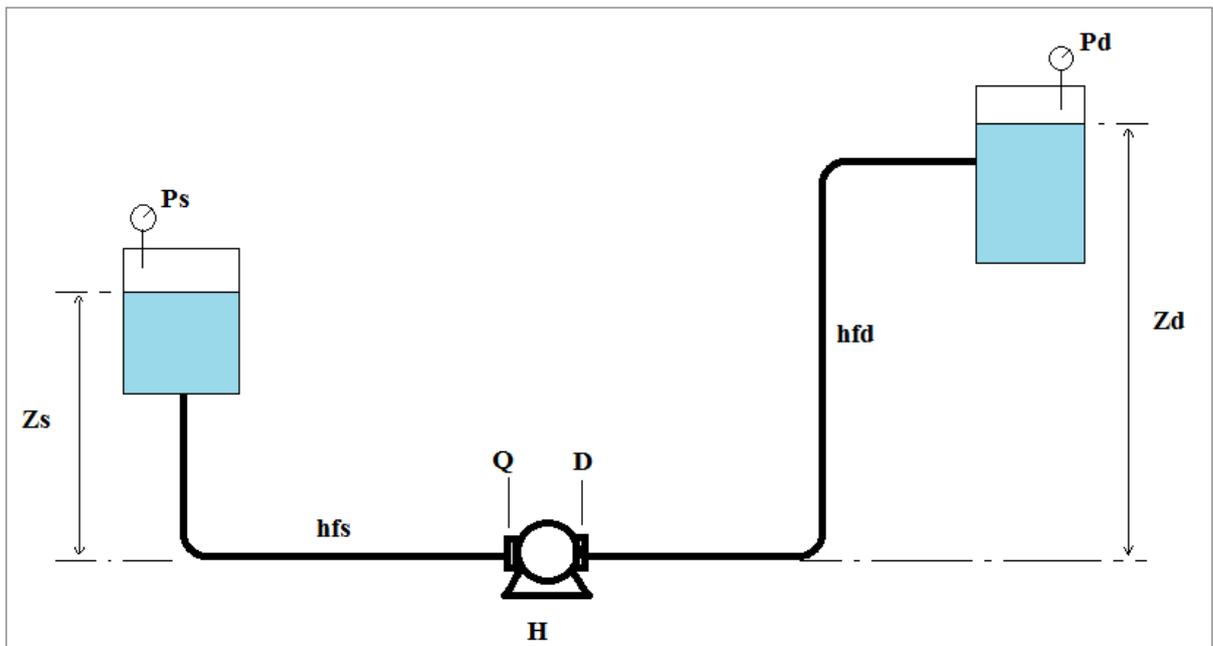
Pelo Método do comprimento equivalente, para regime turbulento, temos:

$$h_f = 0,00826 fL \frac{Q^2}{D^5}$$

**Equação 02:** Perda de carga, método do comprimento equivalente.

Os comprimentos equivalentes dos acessórios podem ser obtidos através dos Anexos 03-a, 03-b, 03-c, e 03-d.

- **Altura Manométrica**



**Figura 05** – Sistema de bombeamento. [4]

**Altura Manométrica de Sucção ( $h_s$ )**

$$h_s = Z_s + \frac{P_s}{\Gamma} - h_{fs}$$

**Equação 03:** Altura manométrica de sucção.

**Altura Manométrica de Descarga ( $h_d$ )**

$$h_d = Z_d + \frac{P_d}{\Gamma} + h_{fd}$$

**Equação 04:** Altura Manométrica de Descarga.

**Altura Manométrica Total ( $H$ )**

$$H = h_d - h_s = (Z_d - Z_s) + \frac{(P_d - P_s)}{\Gamma} + (h_{fs} + h_{fd})$$

**Equação 05:** Altura Manométrica Total.

$H$  = Head = carga da bomba = AMT = pressão diferencial = energia que a bomba tem que fornecer (por unidade de peso) ao sistema para realizar o escoamento (m).

- Curva do Sistema

Os sistemas de bombeamento normalmente são compostos por diversos elementos, tais como bombas, válvulas, tubulações e acessórios, os quais são necessários para obter-se a transferência do fluido de um ponto para outro. Já foi mostrado no item anterior, como calcular a Altura Manométrica Total do sistema para uma determinada vazão desejada. Os parâmetros Vazão ( $Q$ ) e Altura Manométrica Total ( $H$ ) são fundamentais para o dimensionamento da bomba adequada para o sistema. Muitas vezes, no entanto, é necessário conhecer-se não somente um ponto de operação do sistema ( $Q$  e  $H$ ), mas a **Curva Característica do Sistema**, ou seja, a Altura Manométrica Total correspondente a cada vazão, dentro de uma determinada faixa de operação do sistema.

Esta curva é de grande importância, sobretudo em sistemas que incluem associações de bombas, sistemas com variações de níveis nos reservatórios, sistemas com vazões variáveis, etc.

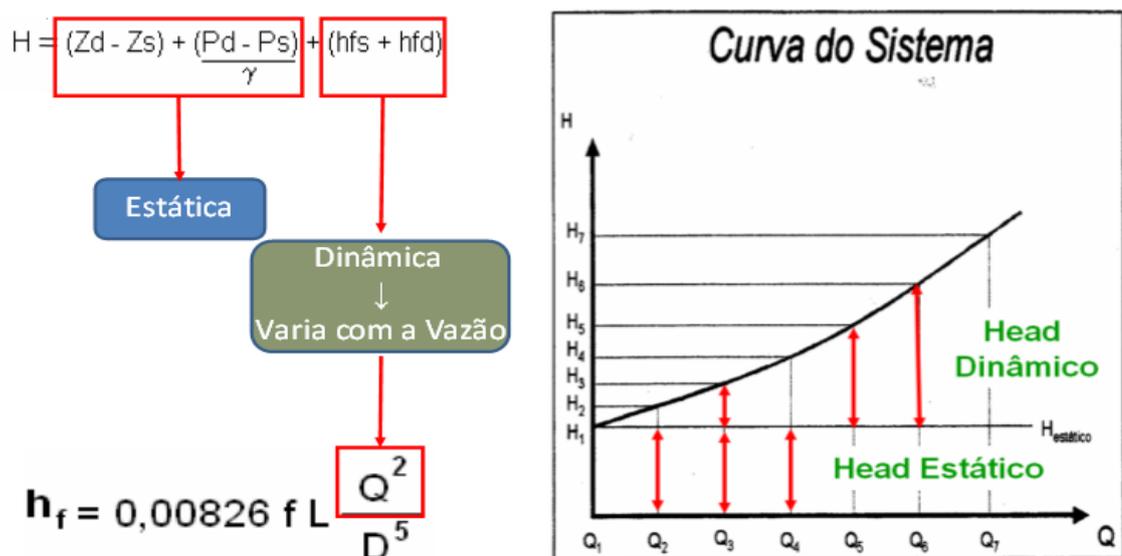


Figura 06 – Curva do Sistema. [4]

A curva característica de um sistema de bombeamento apresenta duas partes distintas, ou seja, a parte estática e a parte dinâmica.

A **parte estática** corresponde à altura estática e independe da vazão do sistema, ou seja, a carga de pressão nos reservatórios de descarga e sucção e a altura geométrica. A altura estática do sistema pode ser calculada pela *Equação 06*:

$$H_e = \left( \frac{P_d - P_s}{\Gamma} \right) + (Z_d - Z_s)$$

**Equação 06:** Altura estática do sistema.

A **parte dinâmica** corresponde à altura dinâmica, ou seja, com o fluido em movimento, gerando carga de velocidade nos reservatórios de descarga e sucção e as perdas de carga, que aumenta com o quadrado da vazão do sistema, conforme *Equação 07*:

$$H_d = k \cdot Q^2$$

**Equação 07:** Altura dinâmica do sistema.

### 2.1.1.2. Princípios de Funcionamento

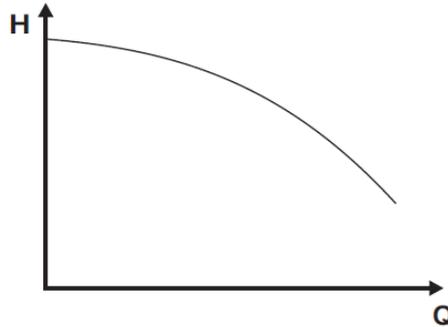
- Curvas características das Bombas

As curvas características das bombas são representações gráficas que demonstram o funcionamento da bomba, obtidas através de experiências do fabricante, que fazem a bomba alcançar diversas alturas manométricas com vazões distintas, analisando também a potência absorvida e a eficiência da bomba.

Dependendo do tipo de bomba, do diâmetro e quantidade de pás dos impelidores e do ângulo de inclinação destas pás, as curvas características das bombas, também chamadas de curvas características do rotor, apresentam-se de várias formas, como mostram os modelos abaixo:

### a) CURVA TIPO ESTÁVEL OU TIPO RISING

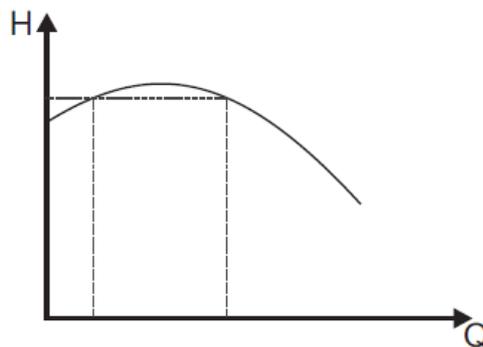
Na curva tipo estável, ao diminuir a vazão a altura aumenta continuamente. A altura correspondente à vazão nula é entorno de 10 a 20% maior que a altura para o ponto de maior eficiência.



**Figura 07:** Curva tipo Rising. [09]

### b) CURVA TIPO INSTÁVEL OU TIPO DROOPING

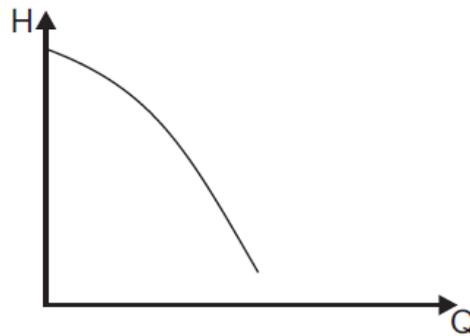
Na curva tipo drooping a altura gerada com a vazão zero é menor do que as outras correspondentes a algumas vazões. Neste modelo, observa-se que para alturas superiores ao “shut-off”, tem-se duas vazões diferentes para uma mesma altura.



**Figura 08:** Curva tipo Drooping. [09]

**c) CURVA TIPO INCLINADO ACENTUADO OU TIPO STEEP**

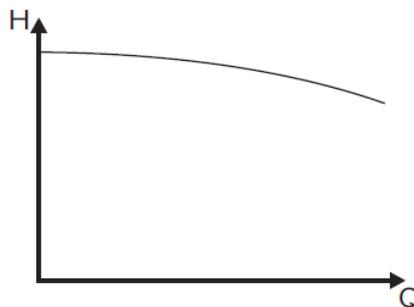
A curva do tipo inclinado é semelhante a uma curva do tipo estável, sendo que, existe uma grande diferença entre a altura gerada na vazão zero (shut-off) e a desenvolvida na vazão de projeto, ou seja, cerca de 40 a 50%.



**Figura 09:** Curva tipo Steep. [09]

**d) CURVA TIPO PLANA OU TIPO FLAT**

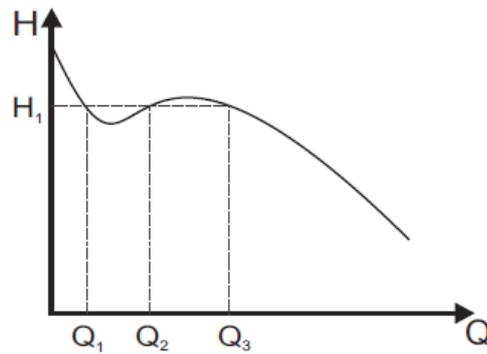
Na curva tipo plana, a altura varia muito pouco com a vazão desde o shut-off até o ponto de projeto.



**Figura 10:** Curva tipo Flat. [09]

### e) CURVA TIPO INSTÁVEL

É a curva na qual para uma mesma altura, corresponde duas ou mais vazões em certo trecho de instabilidade. É idêntica a curva drooping.



**Figura 11:** Curva tipo instável. [09]

- NPSH – Net Positive Suction Head (Energia Positiva de Sucção)

É um dos mais polêmicos termos associado a bombas, porém sua compreensão é essencial para o bom funcionamento. Assim devemos entender os conceitos de NPSH disponível e requerido.

#### a) NPSH disponível

É uma característica da instalação em que a bomba opera, isto é, pressão disponibilizada pela instalação para um determinado fluido.

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = \frac{P_{rs} + P_{\text{atm}} + p_v}{\Gamma} (-\Delta P_s)(\pm H_{\text{geos}})$$

**Equação 08:** Energia Positiva de Sucção.

Obs.: Para sucção negativa, subtrai a  $H_{\text{geos}}$ . Para sucção positiva (bomba afogada) soma-se a  $H_{\text{geos}}$ .

## b) NPSH requerido

Representa a pressão acima da pressão de vapor requerida pela bomba para que não ocorra a cavitação. Os fabricantes apresentam o NPSH requerido pela bomba através de curvas levantadas em banco de prova. **O NPSH disponível deve ser sempre maior que o NPSH requerido.**

- Curva de potência consumida pela bomba

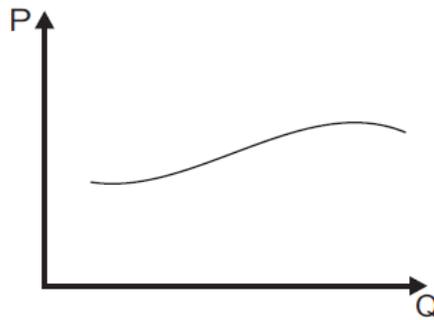
Em função de características elétricas do motor que aciona a bomba, determina-se a potência consumida por ela, ou seja, juntamente com o levantamento dos dados para elaborar a curva de vazão versus altura manométrica total ( $Q \times H$ ). Sendo assim, através do painel de comando do motor acionador da bomba que está sendo testado, estão incrementados instrumentos de medições elétricas tendo como exemplos, wattímetros, amperímetros, voltímetros, etc., que fornecem dados para traçar as curvas de potência consumida versus vazão ( $P \times Q$ ).

Essas curvas são plotadas em um gráfico, onde no eixo das abcissas, temos os valores de vazão ( $Q$ ) e no eixo das ordenadas os valores de potência consumida ( $P$ ).

Para cada tipo de fluxo (Misto, radial e axial), verifica-se a existência de curvas de potências consumidas diferentes, conforme abaixo:

### a) CURVA DE POTÊNCIA CONSUMIDA DE UMA BOMBA DE FLUXO MISTO OU SEMI-AXIAL.

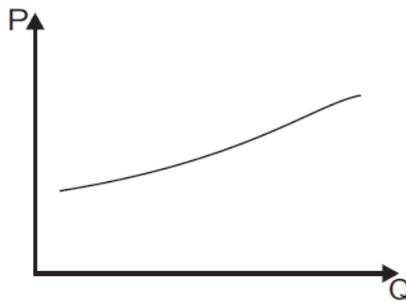
Em uma bomba de fluxo misto, a potência consumida aumenta até certo ponto, mantendo-se constante até certos valores consecutivos de vazão e decresce em seguida. Esta curva tem como ponto positivo não sobrecarregar o motor em qualquer ponto de trabalho, entretanto este tipo de curva não é obtido em todas as bombas. Estas curvas também são conhecidas como "no over loading"



**Figura 12:** Curva de potência consumida de uma bomba de fluxo misto. [09]

### b) CURVA DE POTÊNCIA CONSUMIDA DE UMA BOMBA DE FLUXO RADIAL

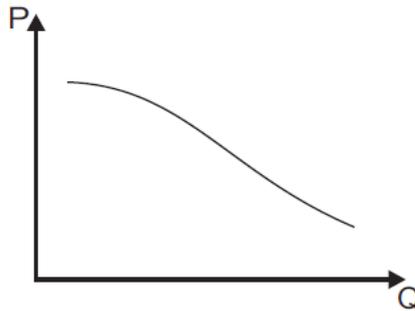
Em uma bomba de fluxo radial, a potência aumenta continuamente com a vazão. Para que sua potência cubra todos os pontos de operação o motor deve ser bem dimensionado. Em sistemas com alturas variáveis, é necessário verificar as alturas mínimas que poderão ocorrer, para evitar assim o perigo de sobrecarga. Estas curvas também são conhecidas como "over loading".



**Figura 13:** Curva de potência consumida de uma bomba de fluxo radial. [09]

### c) CURVA DE POTÊNCIA CONSUMIDA DE UMA BOMBA DE FLUXO AXIAL

As bombas de fluxo axial, a potência consumida é alta para pequenas vazões e ao longo do aumento desta vazão, a potência diminui gradativamente.



**Figura 14:** Curva de potência consumida de uma bomba de fluxo axial. [09]

### 2.1.2. Cálculo de Potência Consumida pela Bomba

- POTÊNCIA HIDRÁULICA

O trabalho útil feito por uma bomba centrífuga é naturalmente o produto do peso do líquido deslocado pela altura desenvolvida. Considerando-se este trabalho na unidade de tempo, temos a potência hidráulica, que é expressa pela fórmula:

$$P_h = \frac{\Gamma \cdot Q \cdot H}{270}$$

**Equação 09:** Potência hidráulica.

Onde, 270 = fator de conversão.

- POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA

Para calcular a potência consumida pela bomba, basta utilizar o valor do rendimento da bomba, pois a potência hidráulica não é igual à potência consumida, pois existem perdas por atrito no próprio conjunto (motor, bomba, etc.).

$$\eta_b = \frac{\text{Potência hidráulica}}{\text{Potência consumida}}$$

**Equação 10:** Rendimento da bomba.

- POTÊNCIA DESTRUTIVA

A Potência Destrutiva pode justificar a instalação de DVR`s em sistemas de bombeio com problemas de confiabilidade, sendo esta expressa pela fórmula abaixo:

$\eta$  = Eficiência hidráulica

$$\eta = \frac{\text{Potência Hidráulica}}{\text{Pot. Eixo motor}}$$

$$\text{Potência Hidráulica} = \eta \times \text{Pot. Eixo motor}$$

Sendo assim; Potência Destrutiva =  $(1 - \eta) \times P_{ot.e}$

Ou ainda;  $P_{ot.e} = P_{ot.H} + P_{ot.D}$

Para uma determinada  $P_{ot.H}$ , quanto menor for a  $P_{ot.e}$ , menor será a  $P_{ot.D}$ .

### 2.1.3. Fator de Carga Estática

O Fator de Carga Estática está associado à declividade da Curva do Sistema.

**$f_{H0}$  aumenta → Declividade Diminui**

$f_{H0}$  → deve ser calculado para o Ponto Rated.

Apesar de cada ponto de operação possuir um  $f_{H0}$  próprio, para efeito de avaliações concernentes à variação de rotação, somente o do ponto rated interessa. Portanto, quando nada for mencionado o  $f_{H0}$  refere-se ao ponto rated. Abaixo estão alguns exemplos dos efeitos na curva do sistema ao variar o  $f_{H0}$ :

- Sistemas com Carga Estática Nula;

Nesses sistemas a variação de rotação permite dosar a energia liberada para a bomba a valores mínimos, viabilizando o aproveitamento das energias potenciais de altura e pressão do sistema no deslocamento do produto.

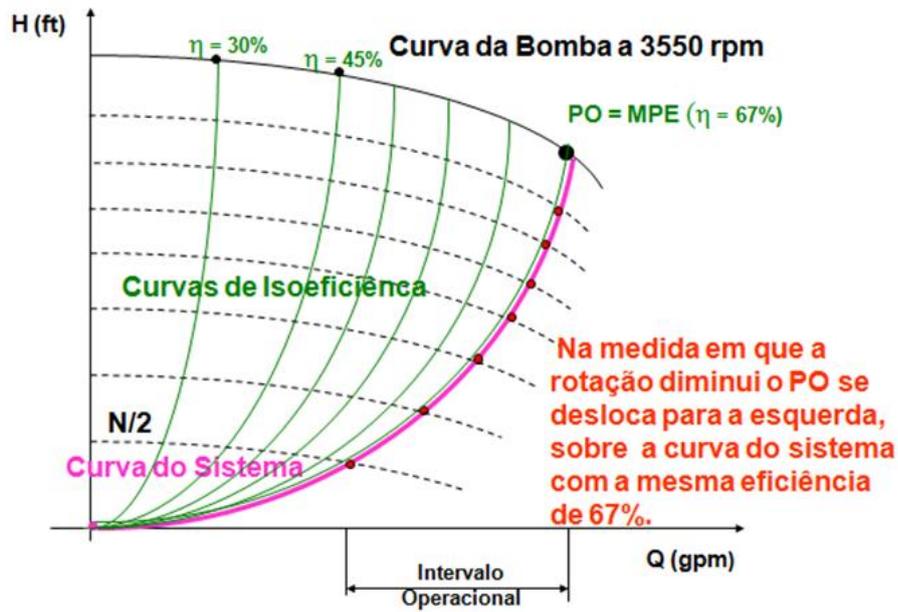


Figura 15: Sistema com carga estática nula. [14]

- Sistemas com  $f_{H0} = 20\%$ ;

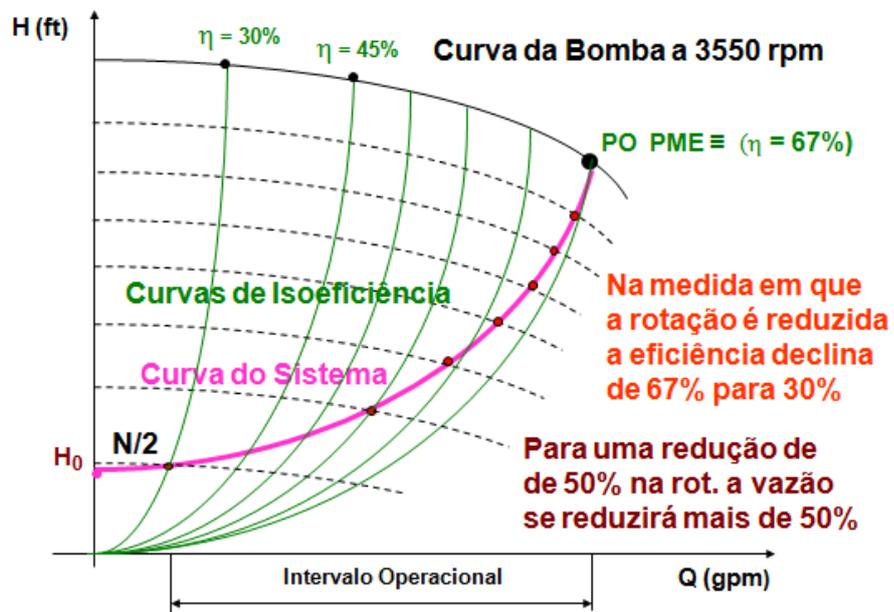


Figura 16: Sistema com fator de carga igual a 20%. [14]

- Sistemas com  $f_{H0} = 80\%$ ;

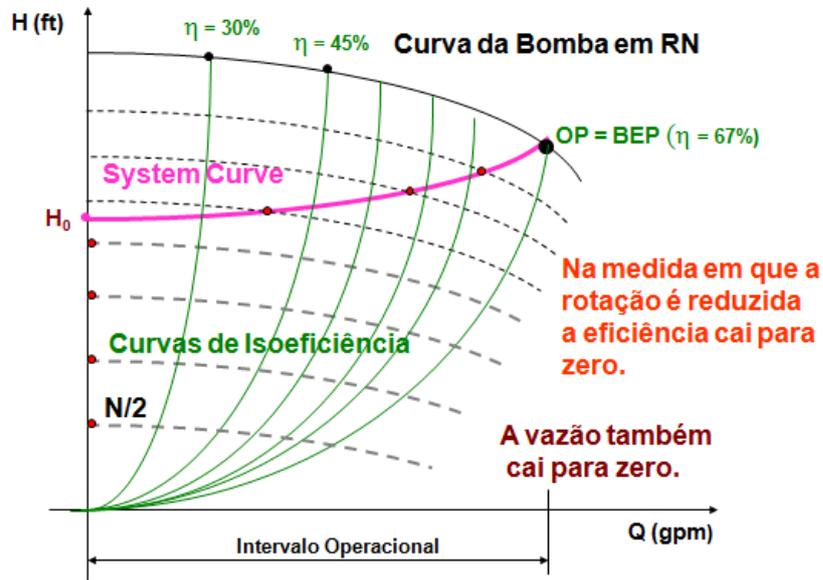


Figura 17: Sistema com fator de carga igual a 80%. [14]

### 2.1.4. Ponto de Operação do Sistema

A interseção entre a curva da bomba e curva do sistema fornece o ponto normal de trabalho, conforme ilustrado na Figura 18.

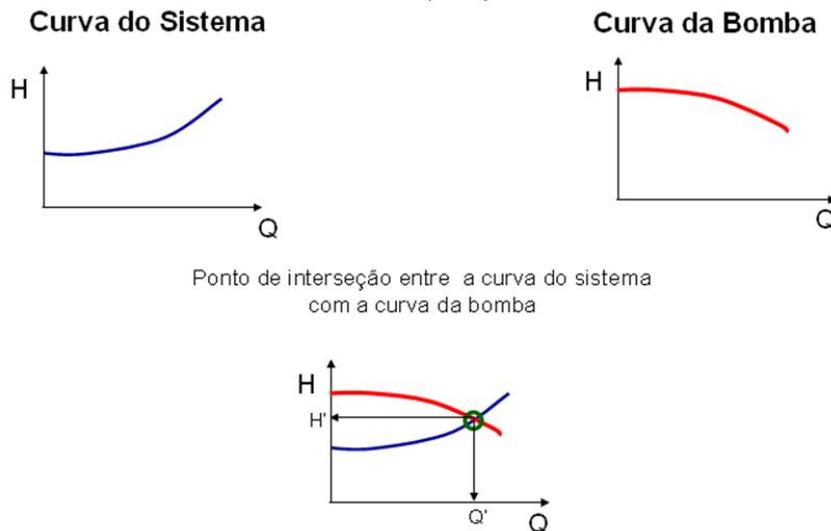
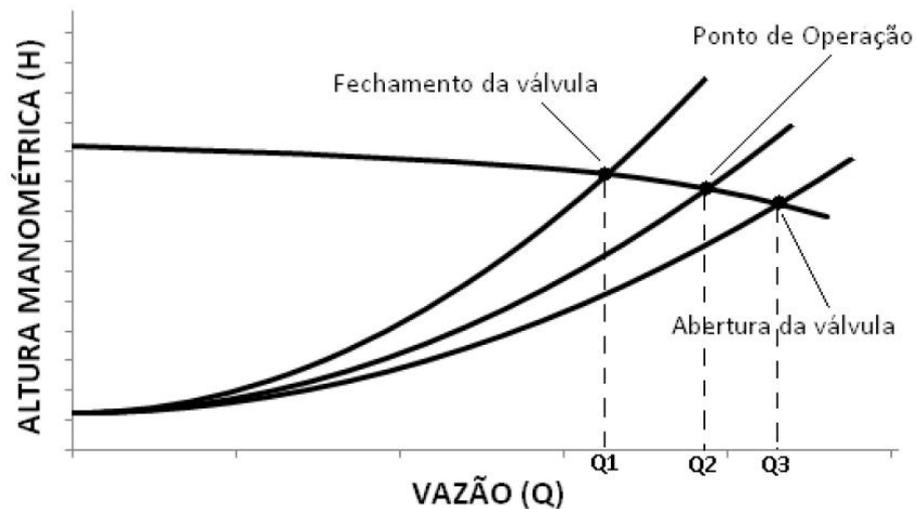


Figura 18: Ponto de Operação. [4]

A bomba operará na vazão  $Q'$ , com head  $H'$ .

### 2.1.5. Modificação da Curva do Sistema

Quando características físicas são modificadas no sistema, a sua curva também é alterada. A alteração mais usual da curva do sistema é realizada através da abertura / fechamento parcial da válvula de descarga; com isto, segundo *DE FALCO e DE MATTOS (1998)* aumenta-se a perda de carga, fazendo com que a curva do sistema seja deslocada para a esquerda. A *Figura 19* ilustra o comportamento da curva diante de variações na abertura de válvulas de controle instaladas em uma linha.



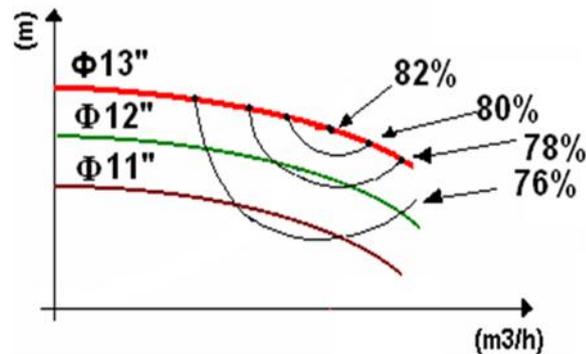
**Figura 19:** Variação da curva do sistema por abertura / fechamento parcial da válvula de descarga. [12]

Se neste caso o fechamento fosse total, a curva do sistema resultaria vertical e, sendo assim, teríamos vazão nula.

É importante destacar que o mesmo efeito seria obtido com fechamento parcial da válvula de sucção; entretanto, este procedimento não é usado devido à má influência nas condições de sucção do sistema.

### 2.1.6. Eficiência das bombas para rotação constante

A eficiência das bombas é um parâmetro fundamental na análise de viabilidade econômica, uma vez que essa característica pode variar bastante com o ponto de operação da bomba. Embora o rendimento operacional seja especificado no projeto da bomba, o fabricante deve fornecer as curvas de eficiência do equipamento, como mostrado na *Figura 20*.



**Figura 20:** Curvas de isoeffiência apresentadas com curvas de bombas de diferentes diâmetros de rotor. [14]

### 2.1.7. Efeito da mudança da rotação da bomba

Existe uma proporcionalidade entre os valores de vazão ( $Q$ ), altura manométrica total ( $H$ ) e potência ( $P$ ) com a rotação. Sendo assim, ao alterarmos a rotação de uma bomba haverá, em consequência, a alteração nas curvas características, sendo a correção para a nova rotação feita a partir das seguintes proporções levando em consideração o diâmetro do impelidor constante:

1 - A vazão é proporcional à rotação.

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1}$$

**Equação 11:** Vazão proporcional à rotação.

2 - A altura manométrica varia com o quadrado da rotação.

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{N}{N_1}\right)^2$$

**Equação 12:** Altura manométrica varia com o quadrado da rotação.

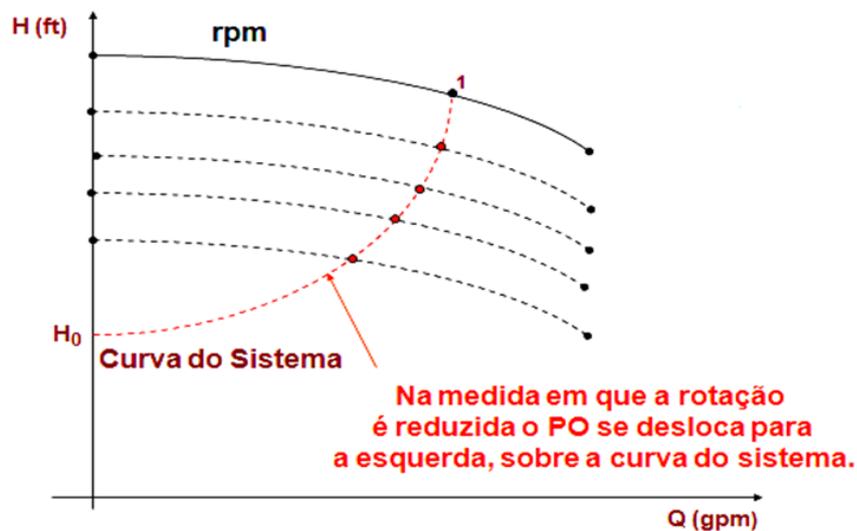
3 - A potência absorvida varia com o cubo da rotação.

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{N}{N_1}\right)^3$$

**Equação 13:** potência absorvida varia com o cubo da rotação.

Desta forma, sempre que variar a rotação deve ser feita a correção das curvas características de bombas através das equações citadas acima, denominadas de leis de semelhança, para determinação do novo ponto de operação.

A *Figura 21* apresenta as novas curvas obtidas pelo efeito da variação da rotação da bomba. E nota-se que, ao contrário do controle por VC, na medida em que a vazão diminui a pressão de descarga também diminui.



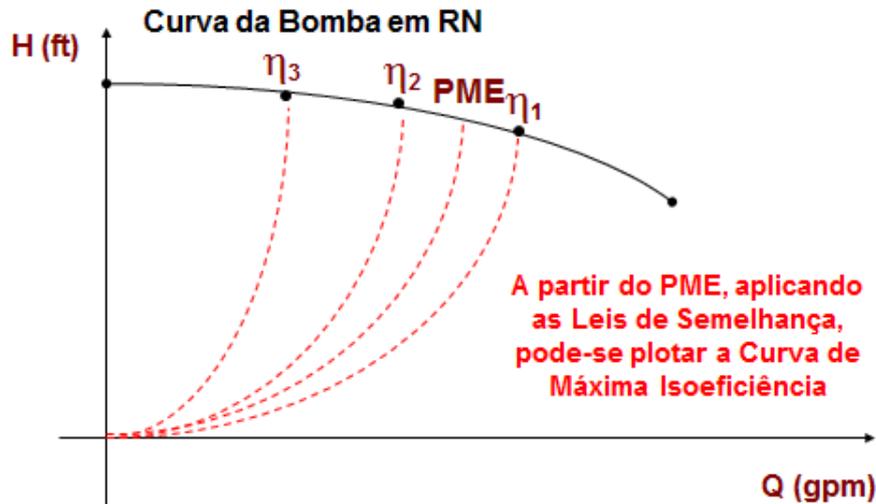
**Figura 21:** Variação da curva da bomba através da variação da rotação. [14]

### 2.1.8. Eficiência das bombas para variação de rotação

A mudança do ponto de operação decorrente da variação da rotação da bomba implica em modificação dos valores de rendimento da mesma.

Segundo *De Mattos e De Falco (1998)*, uma vez que se tenham os valores de rendimento para uma dada rotação da bomba, é possível mapear curvas de eficiência para

outras rotações a partir da aplicação das leis de semelhança para obtenção de pontos de igual rendimento, conforme *Figura 22*.



**Figura 22:** Curvas de isoefficiência da bomba utilizando as leis de Semelhança. [14]

## 2.2. Controle da vazão usando válvula de controle

O controle da vazão através do uso de válvulas de controle é um método comum em sistemas de bombeio na maioria das indústrias. Esta prática é de fácil manuseio e possibilita uma gama de ajustes no controle da vazão. Porém, o mesmo resulta em um baixo nível de eficiência energética do sistema, uma vez que a bomba opera o tempo todo em sua rotação nominal. Este controle pode ser realizado por meio de duas configurações diferentes:

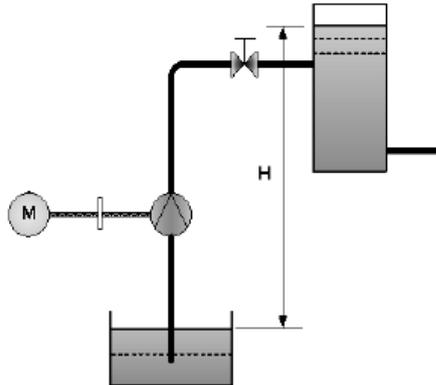
- Válvula de controle instalada na linha do sistema;
- Válvula de controle instalada na recirculação do fluido;

### 2.2.1. Válvula de controle instalada na linha do sistema

Quando a válvula de controle está instalada diretamente na linha do sistema, o controle da vazão é feito com base no aumento da perda de carga ao sistema através do estrangulamento da mesma. Esta redução de área gera um aumento na pressão da linha do

sistema, podendo danificar assim, o conjunto de equipamentos (motor, bomba,...) e tubulação, caso a mesma não esteja projetada para atender tais mudanças nas condições de operação.

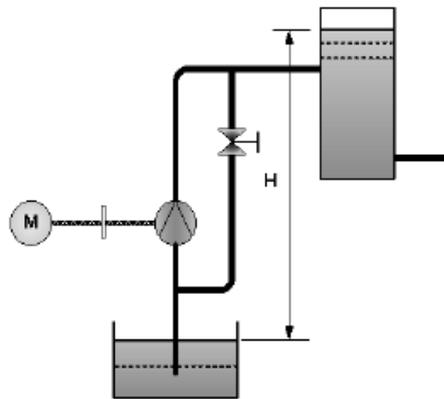
Outro problema que pode ser causado na bomba é a recirculação do fluido dentro da mesma, provocando vibrações exageradas. Isso provoca cargas radiais e axiais excessivas nos mancais do motor, seguidas de aquecimento da carcaça e do motor.



**Figura 23:** Sistema com válvula de controle instalada na linha.

### 2.2.2. Válvula de controle instalada na recirculação do fluido

Para tal configuração, a bomba não tem a sua vazão restringida em nenhum momento, ou seja, operando assim continuamente em seu ponto de operação nominal. Embora esta configuração não produza na bomba os efeitos negativos do estrangulamento causado pela válvula instalada diretamente na linha do sistema, ela implica em um consumo de energia desnecessário, devido à recirculação do fluido. A recirculação acontece quando é solicitada uma redução da vazão na descarga da bomba, pois a válvula de recirculação é aberta, permitindo assim que parte do fluido recircule ao invés de passar adiante no processo.



**Figura 24:** Válvula instalada na recirculação do sistema.

### 2.3. Controle da vazão por variadores de velocidade

O controle de vazão realizado através de DVR's busca modificar a curva característica da bomba. A modificação da curva de uma bomba pode ser obtida pela variação de alguns principais fatores, conforme abaixo:

- Rotação da bomba;
- Diâmetro do rotor da bomba.

Pelo fato do diâmetro do rotor ser um parâmetro físico, torna-se difícil modificá-lo continuamente, sendo assim, inviabilizando o controle variável de vazão na bomba, atuando somente pela adequação do diâmetro do rotor. Em contrapartida, a rotação (N) da bomba pode ser continuamente modificada, conforme a *Figura 21*, apresentada anteriormente.

### 2.4. Princípio de funcionamento dos DVR's

O princípio de funcionamento dos DVR's é baseado na alteração da frequência da tensão elétrica de alimentação do motor da bomba, permitindo assim, variar a sua velocidade de rotação. Conforme a equação abaixo, a velocidade de rotação de um motor é proporcional à frequência da corrente elétrica que o alimenta.

$$n = \frac{120 \times f}{p} \times (1 - s)$$

**Equação 14:** Velocidade de rotação do motor.

Como a potência elétrica fornecida aos motores é proporcional à velocidade de rotação do eixo do motor, temos por consequência que, a variação da frequência da corrente elétrica implica na variação da potência fornecida à bomba pelo eixo do motor, conforme equação abaixo.

$$P_m = \frac{C \times \omega}{\eta}$$

**Equação 15:** Potência fornecida à bomba.

### **2.4.1. Vantagens dos variadores de velocidade**

- Economia de energia;
- Melhoria do desempenho, devido à adaptação da velocidade aos requisitos do processo;
- Elimina o pico de corrente na partida do motor;
- Reduz a frequência de manutenção.

Os sistemas de variação de velocidade tradicionais são os variadores mecânicos, variadores hidráulicos e os eletromagnéticos. Nesse trabalho será utilizado o sistema mecânico.

## **2.5. Variador Mecânico**

Os variadores mecânicos foram os primeiros a serem utilizados, pois são os de maior simplicidade de construção e baixo custo.

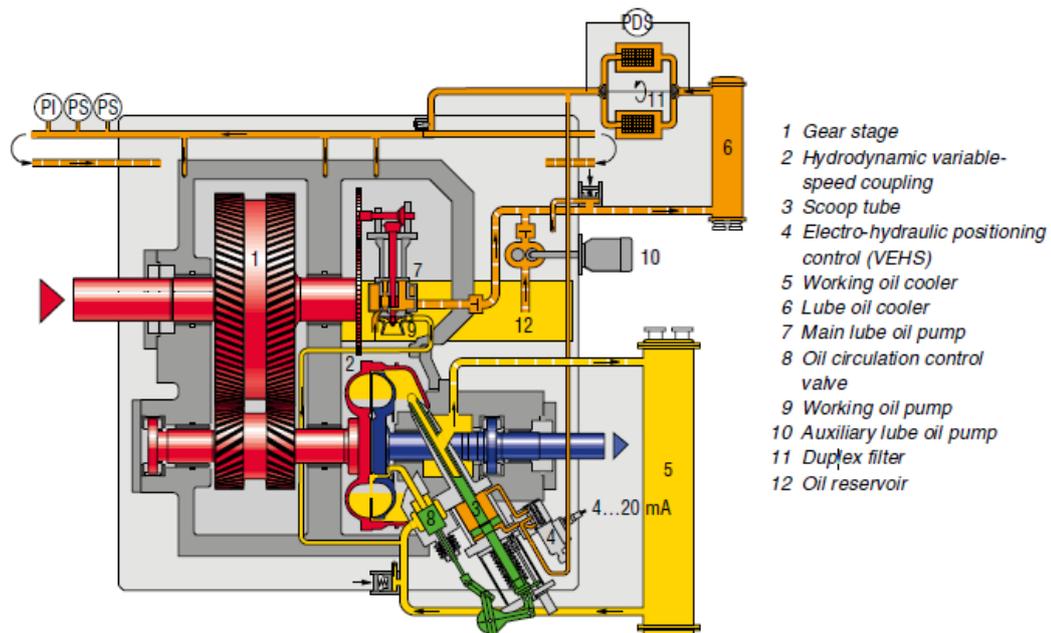
### **2.5.1. Projeto e Funcionamento**

O acoplamento de velocidade variável Voith modelo R17K450M como mostrado na *Figura 25* abaixo, combina engrenagens mecânicas e um sistema hidrodinâmico em uma habitação comum.



**Figura 25:** Acoplador de velocidade variável modelo R17K450M da VOITH. [18]

No sistema de acoplamento hidrodinâmico, o óleo pode variar conforme necessário durante a operação, por meio do tubo de colher. O nível de enchimento do fluido de trabalho no engate é determinado pela posição de um tubo de colher que se projeta radialmente para dentro da câmara de trabalho. Durante a operação, o nível do fluido pode ser modificado de modo contínuo entre o "cheio" e "drenado." Como resultado, a velocidade da máquina de trabalho pode ser controlada com precisão e de forma dinâmica. Outro dado interessante referente ao variador mecânico R17K450M é a possibilidade de fornecimento de óleo lubrificante tanto para o VSD quanto para o motor em questão.



**Figura 26:** Variadores com engrenagens mecânicas. [18]

## 2.6. Situação onde a associação de VC com DVR torna-se obrigatória

Os gráficos abaixo mostram uma região crítica, chamada de “ponto crítico”, a partir do qual, qualquer redução adicional na rotação poderá causar instabilidade no bombeio.

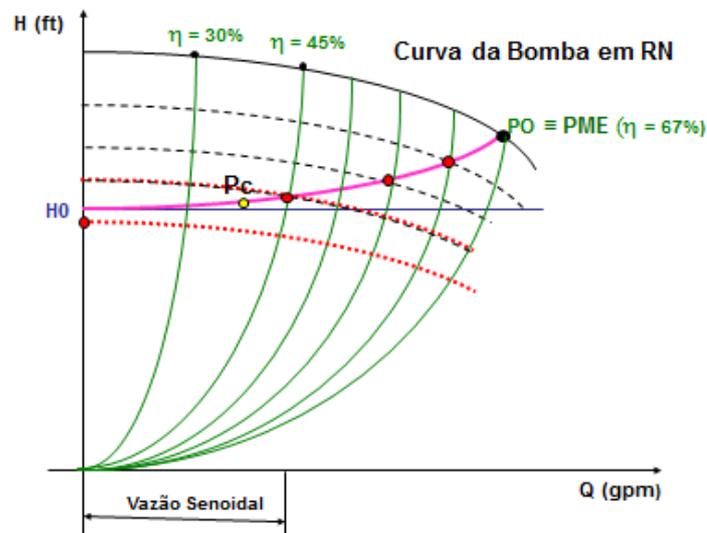


Figura 27: Ponto Crítico. [14]

Por essa razão, quando trabalhando com RV, é essencial conhecer a carga estática do Sistema. Não faz sentido analisarmos a bomba isoladamente. O sistema tem que ser sempre considerado.

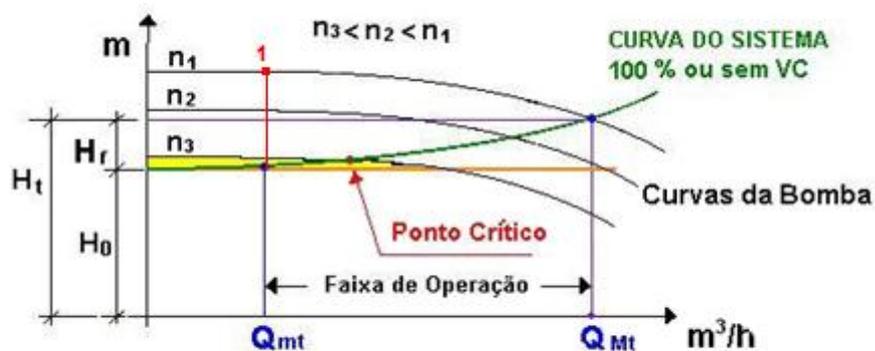


Figura 28: Situação onde a associação de VC com DVR torna-se obrigatória. [14]

## Capítulo 3

### 3. Descrição do Sistema de Coqueamento Retardado

#### 3.1. Coque Verde de Petróleo

O Coque Verde de Petróleo (CVP) é um produto sólido produzido por meio do craqueamento térmico de óleos pesados em uma unidade de processo denominada “Unidade de Coqueamento Retardado” (UCR). Esta unidade permite que as refinarias consigam converter cargas de maior peso molecular, proveniente de fases de refino anteriores, em produtos leves de maior valor agregado como óleo diesel, naftas e GLP. O CVP é um dos produtos gerados nesse processo.

O CVP oriundo de refinarias, apresenta baixo teor de enxofre, o que lhe confere maior valor no mercado e menor impacto ambiental durante sua aplicação. Além disso, possui elevado teor de carbono fixo, baixo teor de cinzas, elevado poder calorífico e alta estabilidade química. É também um produto insolúvel em água, não explosivo, não reativo e que apresenta um alto ponto de ignição.

As duas fontes do produto que abastecem o mercado nacional são: a Petrobras, que comercializa CVP com baixo teor de enxofre (BTE) e a importação direta, por meio da qual as indústrias nacionais adquirem CVP com alto teor de enxofre (ATE).



**Figura 29:** Finos de coque extraído no Processo de Coqueamento retardado.

## **3.2. Funcionamento do Processo de Coqueamento Retardado**

No coqueamento retardado o objetivo é produzir coque. Para isso, a matéria prima, normalmente o resíduo da coluna de vácuo, é aquecida até pouco acima de 500°C sob 4-5 atm. O material aquecido é colocado em tambores onde permanece resfriando em repouso durante um tempo máximo de 24 horas. Disto decorre o nome de coqueamento retardado. O coque se forma dentro dos tambores e literalmente entope o tambor. Para retirar o coque existem dois métodos: quebrar o coque usando chicotes rotatórios ou, um forte jato de água. No projeto em questão o método usado é o descoqueamento através do jato de água.

## **3.3. Etapas de Realização do Processo de Descoqueamento**

### **3.3.1. Enchimento**

Matéria prima, normalmente o resíduo da coluna de vácuo, é aquecida até pouco acima de 500°C sob 4-5 atm em um período de 24h.

### **3.3.2. Purga com Vapor**

O reator cheio sofre injeção de vapor de média pressão para remover qualquer residual de óleo líquido. Este efluente, que é uma mistura de vapor d'água e vapor de hidrocarbonetos, é enviado para o Sistema de Blowdown, onde os hidrocarbonetos são recuperados e o vapor é condensado tornando-se água ácida. Na etapa inicial da purga este efluente é enviado para a Fracionadora.

### **3.3.3. Resfriamento**

O reator é cheio com água bombeada pela Bomba de Baixa Vazão de Água de Resfriamento dos Reatores A/B e pela Bomba de Alta Vazão de Água de Resfriamento dos Reatores A/B proveniente do Tanque de Água Clarificada. Durante esta etapa parte desta água é vaporizada e junto com os vapores de hidrocarbonetos é enviada para o Sistema de

Blowdown. A outra parte permanece na fase líquida no interior do reator, resfriando o leito de coque para 100°C. O vapor d'água gerado e vapores de hidrocarbonetos serão tratados no Sistema de Blowdown.

O sistema de Blowdown tem duas funções: 1ª: processar o efluente dos reatores durante as operações de purga e resfriamento a fim de recuperar hidrocarbonetos e 2ª: processar resíduo proveniente da Tancagem.

### **3.3.4. Drenagem**

A água da etapa de resfriamento no interior do reator é drenada para a Área de Depósito de Finos de Coque e bombeada para o Tanque através da Bomba de Água Clarificada localizada no Poço do Coke Fines.

### **3.3.5. Abertura dos Flanges**

As válvulas automáticas de topo e de fundo do reator são abertas para permitir o descoqueamento e descarregamento do coque.

### **3.3.6. Descoqueamento**

Água sob alta pressão, bombeada pela Bomba B-0 de Descoqueamento Hidráulico, proveniente do tanque e filtrada pelo filtro da Bomba B-0, é enviada para o Sistema de Descoqueamento Hidráulico (lança e ferramenta de corte), localizado acima dos reatores, sendo utilizada para cortar o leito de coque. Ao término da etapa de corte, esta água é desviada para o tanque, através da válvula de água de descoqueamento. As pedras de coque e a água serão recolhidas no Coke Pit. Sendo assim, a água escoará para o Coke Fines, onde será separada dos finos de coque. A água será então bombeada para o tanque através de uma pequena bomba.

### **3.3.7. Remontagem dos Flanges**

Após o descarregamento do coque, as válvulas automáticas de topo e de fundo dos reatores são fechadas para permitir o início de nova etapa de carregamento.

### **3.3.8. Purga com Vapor e Teste de Estanqueidade**

Após o fechamento das válvulas automáticas de topo e de fundo, os reatores recebem injeção de vapor de média pressão (remoção do ar contido no mesmo) através dos vent's. Após o fechamento dos vent's o reator é pressurizado para realização do teste de estanqueidade;

### **3.3.9. Aquecimento**

O reator vazio e testado recebe parte do efluente de topo de seu par, que está em fase final de enchimento, para que possa ser feito o seu aquecimento. Como este reator vazio está frio, parte da corrente de aquecimento condensa. Durante esta operação de aquecimento o condensado formado é alinhado pelo bocal de carga no fundo do reator para o Vaso de Condensado dos Reatores. Neste vaso ocorre a separação do condensado e do vapor gerado. O condensado do fundo será bombeado pela Bomba de Condensado dos Reatores, sendo primeiramente filtrado e enviado para a Fracionadora, na seção acima da entrada dos efluentes dos reatores (acima das chicanas) ou para a Torre de Blowdown, na seção de topo. Os vapores do são também enviados para a Fracionadora na seção de fundo acima do “*heatshield*” e abaixo da entrada do efluente do reator. O reator, a uma temperatura de aproximadamente 350°C, está pronto para iniciar uma nova operação de enchimento. Neste momento, a válvula switch (dependendo do par de reatores) deve ser alinhada para o reator aquecido e vazio, pronto para a nova etapa de enchimento. Na foto a seguir está a unidade de coqueamento retardado com quatro tambores.



**Figura 30:** Unidade de Coqueamento com 4 Reatores.

### **3.4. Descrição do Sistema Estudado**

Esta unidade de Coqueamento Retardado foi projetada para processar Resíduo de Vácuo de Petróleo, de modo a maximizar a produção de destilados que serão enviados a outras unidades, simultaneamente, produzindo Coque Verde de Petróleo.

A Unidade de Coqueamento Retardado consiste dos seguintes sistemas:

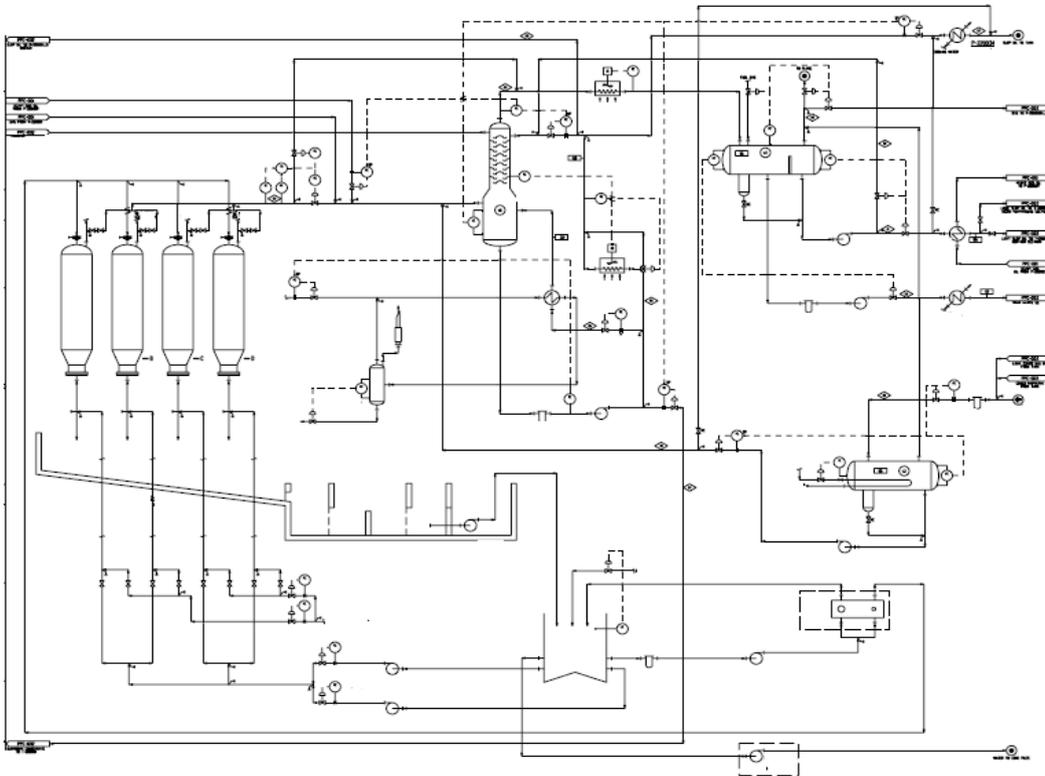
- Sistema de Carga Fresca;
- Sistema de Pré-aquecimento;
- Sistema de Fracionamento (Torre de Fracionamento e Retificadoras);
- Sistema de Coqueamento (Fornos e Reatores);
- Sistema de Compressão;
- Sistema de Recuperação de Gases;
- Sistema de Blowdown;
- Sistema de Descoqueamento e Água Clarificada;
- Sistema de Geração de Vapor;
- Sistema de Tratamento de GLP com amina.

A Unidade possui capacidade de processamento de 7640 t/d de Resíduo de Vácuo de Petróleo.

Os reatores de coque são capazes de operar em ciclos reduzidos de até no mínimo 18 horas, caso o resíduo processado apresente um rendimento de coque produzido acima do estimado.

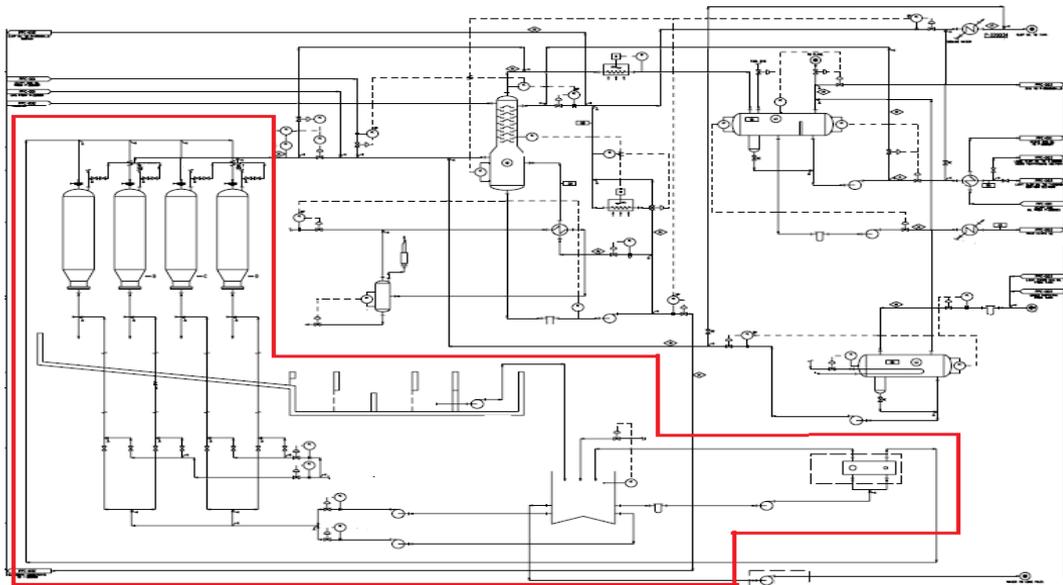
### 3.4.1. Descrição do Sistema Atual

O sistema atual é caracterizado por diversos equipamentos, entre eles, bombas centrífugas, válvulas, permutadores, purgadores, etc... Como mostrado no desenho da *Figura 31*:



**Figura 31:** Sistema completo de uma Unidade de Coqueamento Retardado.

Sendo assim, para manter o foco no estudo em questão e facilitar as análises realizadas foi simplificado o sistema, levando em consideração a região crítica (processo de descoqueamento) para o estudo da viabilidade técnica-econômica, como mostrada na *Figura 32* abaixo:



**Figura 32** - Região crítica para o estudo de viabilidade técnica-econômica.

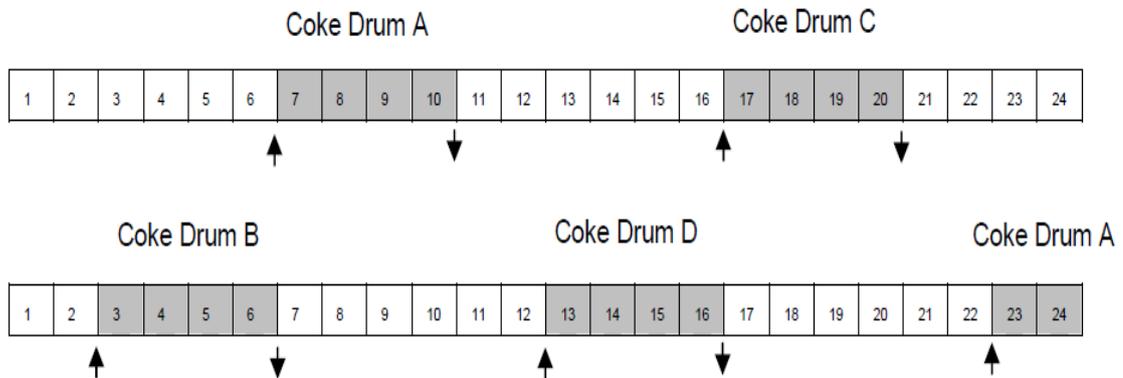
O procedimento de funcionamento desta parte do Sistema consiste na utilização de quatro reatores no qual serão feitos os processamentos de descoqueamento retardado mostrado anteriormente através de etapas de realização do processo.

No trecho do Sistema destacado acima, estão presentes as bombas b-1 (baixa vazão) e b-2 (alta vazão), que são bombas responsáveis pela etapa de resfriamento do processo. Estas bombas utilizam o tanque de água clara (TQC) para poderem realizar esta etapa do processo.

O TQC é considerado o ponto inicial e final de todo o processo de coqueamento retardado. É também através dele que a bomba de água (Jet Pump) para descoqueamento dos reatores atua, sendo ela a principal bomba do processo e a responsável pelo estudo de viabilidade técnica-econômica. As causas para este estudo serão relatadas mais abaixo.

A bomba principal deverá operar conforme o ciclo mostrado abaixo:

- Para o ciclo de enchimento de 20 horas, a bomba de água para descoqueamento deve iniciar a cada 10 horas, como mostrado abaixo:



**Figura 33:** Esquemático do processo de descoqueamento em um intervalo de 48 horas.

[13]

A *Figura 33* mostra em um intervalo de 48h do processo de descoqueamento momentos em que ocorre a entrada da bomba B-0 a alta pressão sem estrangulamento da válvula de controle a cada intervalo de 6h (quadrados brancos), permanecendo atuante por um período de 4h (quadrado acinzentado). Sendo que neste intervalo de 6h a bomba continua em operação, pois sofrendo um forte estrangulamento para ocorrer a recirculação para o tanque.

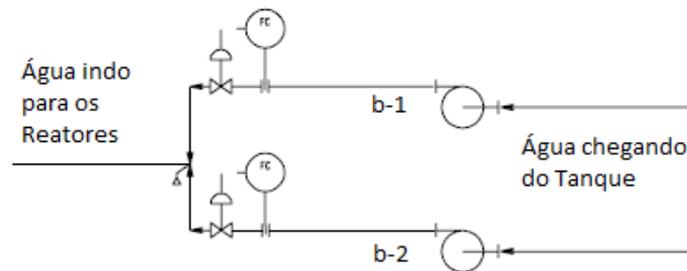
O tempo do ciclo completo de operação de cada reator é de 40 horas, sendo 20 horas para enchimento do reator e 20 horas para descoqueamento do mesmo. A operação de descoqueamento consiste das seguintes etapas: purga com vapor, resfriamento com água, drenagem, abertura do reator, descoqueamento, fechamento do reator, purga e teste com vapor, e aquecimento, como indicado na *Tabela 01* abaixo:

**Tabela 01** – Tempos de operação dos Reatores de Coque A/B/C/D.

TEMPO (hora)	A	B	C	D		
1	Enchimento (20 horas)	Purga (1,5 hora)	Descoqueamento (4 horas)	Enchimento (20 horas)		
2		Resfriamento (6 horas)			Fechamento (1 hora)	
3						Purga/teste (1 hora)
4						
5			Pré-Aquecimento (4 horas)			
6						
7						
8						
9		Drenagem (1,5 hora)				
10		Abertura (1 hora)				
11		Descoqueamento (4 horas)	Enchimento (20 horas)	Purga (1,5 horas)		
12				Resfriamento (6 horas)		
13					Fechamento (1 hora)	
14						Purga/teste (1 hora)
15						
16					Pré-Aquecimento (4 horas)	
17						
18						
19						
20		Drenagem (1,5 horas)				
21	Abertura (1 hora)					
22	Purga (1,5 horas)	Enchimento (20 horas)	Descoqueamento (4 horas)			
23	Resfriamento (6 horas)			Fechamento (1 hora)		
24					Purga/teste (1 hora)	
25						
26			Pré-Aquecimento (4 horas)			
27						
28						
29						
30	Abertura (1 hora)					
31	Enchimento (20 horas)		Enchimento (20 horas)	Purga (1,5 horas)		
32		Resfriamento (6 horas)				
33				Fechamento (1 hora)		
34					Purga/teste (1 hora)	
35						
36				Pré-Aquecimento (4 horas)		
37						
38						
39						
40	Abertura (1 hora)					

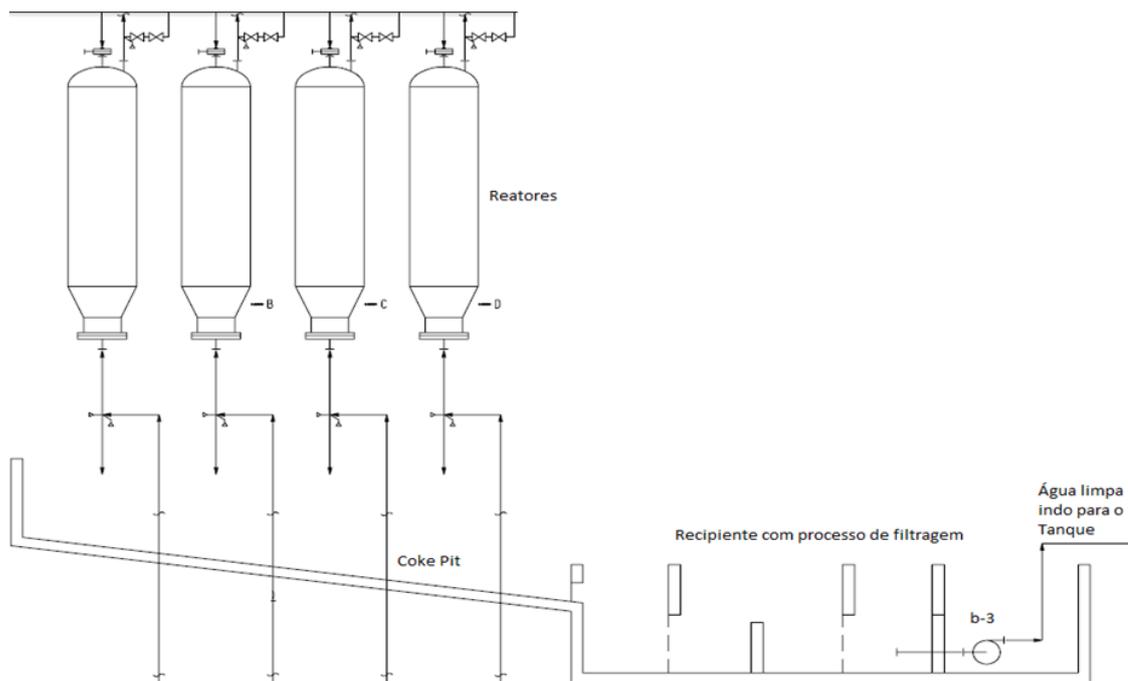
### 3.4.2. Característica do Sistema Atual (Simplificado)

O bombeamento do resíduo de vácuo de Petróleo para o processo de descoqueamento é realizado por um sistema constituído pelas bombas centrífugas de modelos iguais b-1, b-2, b-3 e B-0 (Jet Pump) de modelo diferente. As bombas b-1 (baixa vazão) e b-2 (alta vazão) estão arranjadas em paralelo, conforme *Figura 34* e são responsáveis pela etapa de Refrigeração do ciclo de descoqueamento.



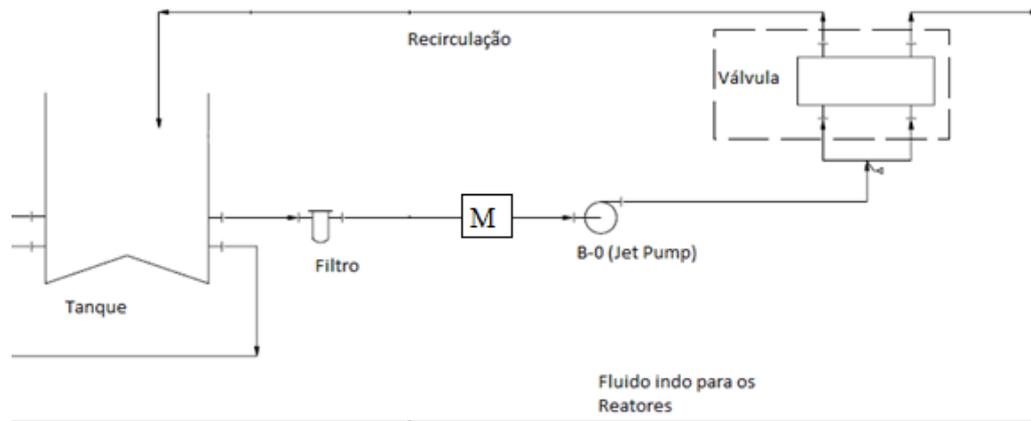
**Figura 34:** Esquemático das bombas b-1 e b-2.

A bomba b-3 é a bomba responsável pela transferência da água localizada no recipiente, vinda da drenagem dos reatores durante o processo de descoqueamento. A bomba b-3 está esquematizada na *Figura 35* abaixo:



**Figura 35:** Esquemático da bomba b-3.

Por fim, tem-se a B-0 (Jet Pump), considerada a principal bomba de todo o processo de descoqueamento da Unidade em questão. Esta bomba é responsável por levar água do Tanque por meio de jateamento a alta pressão ocorrido na etapa de descoqueamento para a formação dos finos de coque. A *Figura 36* abaixo exemplifica bem esta parte do processo.



**Figura 36:** Esquemático da bomba B-0 (Jet Pump).

A bomba B-0 (Jet Pump) funciona 24h e seu fluxo de descarga é controlado através da válvula de controle mostrada na Figura acima. Esta válvula atua em duas frentes. A primeira é quando ela é responsável por restringir a vazão da bomba B-0 quando esta em questão se encontra em processo de recirculação e a segunda é quando ela libera por completo a vazão exercida pela bomba B-0 a alta pressão para atuar no processo de descoqueamento dentro dos Reatores.

A bomba B-0 possui condições operacionais conforme tabela abaixo:

**Tabela 02:** Condições operacionais da bomba B-0 (Jet Pump).

CARACTERISTICA	VALOR
Vazão nominal de operação	285 m <sup>3</sup> /h
Vazão para recirculação	152 m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica total de operação	3.153 m
Rendimento nominal da bomba	71%
Diâmetro do rotor	356,7 mm
Viscosidade do fluido à temperatura de operação	0,52 cP
Densidade do Fluido	0,988 SG
Potência	3.397 kW
Rotação	4.405 rpm

### 3.4.3. Acionamento da bomba B-0 (Jet Pump)

A bomba B-0 atualmente instalada é acionada pelo motor elétrico de indução trifásico M-0 da fabricante WEG, com características apresentadas na *Tabela 03*, tendo por intermédio um multiplicador de velocidade para poder atingir os 4405 rpm da bomba. Atualmente, não há variador de velocidade instalado para o motor apresentado, sendo o mesmo acionado por partida direta, operando na rotação nominal (1800 rpm).

**Tabela 03:** Acionamento da bomba B-0.

Acionamento	Rotação	Potência	Voltagem	Frequência	Rendimento	
Motor elétrico de indução	1800 rpm	4030 kW	13200 V	60 Hz	50%	100%
					94,3	96,7

### 3.4.4. Problemas e deficiências no processo atual

A necessidade de controle no processo para descoqueamento dentro dos reatores requer que o sistema varie a vazão bombeada. Entretanto, como o sistema atual não possui qualquer mecanismo para variação da rotação da bomba, é necessário variar a perda de carga na linha por meio da abertura / fechamento da válvula de controle localizada em uma região intermediária à bomba B-0 e os reatores.

Conforme explicitado anteriormente, a abertura / fechamento da válvula de controle provoca o estrangulamento da linha. Este estrangulamento representa perdas energéticas no sistema, pois parte da potência fornecida pelo motor à bomba é dissipada pela perda de carga gerada pelo estrangulamento da linha.

Além disso, esta potência dissipada atua como uma espécie de agente destrutivo na própria bomba, pois é transformado em calor, vibração, turbulência, esforços de mancais e outros efeitos prejudiciais ao equipamento. Estes efeitos resultam em um aumento da necessidade de manutenção no mesmo, ainda mais com uma bomba atuando 24h por dia.

Outro fator negativo neste projeto é a pequena durabilidade da válvula de controle apresentada neste sistema. Esta por sua vez vem tendo inúmeros defeitos, devido até mesmo pelo simples fato de ter que reduzir uma alta pressão de descarga exercida pela bomba B-0

para ocorrer a recirculação, enquanto outros ciclos distintos do descoqueamento ocorrem nos reatores.

Conforme observado na *Tabela 04*, as principais intervenções realizadas pela equipe de manutenção na bomba B-0 estão relacionadas a problemas no sistema de selagem e ao nível de vibração da bomba, problemas estes tipicamente relacionados ao estrangulamento da linha por meio da válvula de controle, sendo esta em questão, responsável por algumas paralizações do processo da Unidade de Coqueamento Retardado por sofrer muitos defeitos.

**Tabela 04:** Histórico de paralizações na bomba B-0.

Defeitos Apresentados	Datas das Paralizações		
	2011	2012	2013
Vazamento pelo Selo Mecânico	Mai	Mar	Mai/Dez
Elevada Vibração na Bomba	Mar	Mai	-
Elevada Vibração no Motor	Mar	Mai	-
Revisão do Selo Mecânico	-	Nov	-

Segundo *Von Haehling (2006)*, o tempo médio entre falhas (MTBF) para sistemas de bombeio envolvendo DVR's pode ser estimado em até 10 anos. Para este estudo, está sendo levado em conta um valor conservativo de 5 anos para o novo MTBF do sistema em estudo após a instalação do variador de rotação. Sendo assim, o percentual de redução nos custos de manutenção depende diretamente do MTBF atual do sistema de bombeamento, de acordo com a *Equação 16*.

$$R_{\%} = 100. \left( \frac{MTBF_{NOVO} - MTBF_{ATUAL}}{MTBF_{NOVO}} \right)$$

**Equação 16:** Redução percentual dos custos de manutenção.

Levando em conta a equação acima, pode-se observar que o tempo médio entre falhas atual da bomba B-0 é bem próximo de 1 ano (valor médio em uma tolerância para mais e para menos). Para efeitos de cálculo será considerado o valor de 1 ano para o MTBF atual. Desta forma, o percentual estimado de redução com custos de manutenção após a implantação de variadores de velocidade é de 80%.

### 3.4.5. Equações para determinação do gasto energético do sistema atual

Para efeitos de cálculo do período analisado do conjunto motor + bomba B-0, considerou-se as perdas energéticas interligadas ao estrangulamento da vazão da bomba B-0 por atuação da válvula de controle, sendo assim, calculadas pelos seguintes passos descritos abaixo:

- a) A *Equação 17* determina o cálculo da potência hidráulica fornecida pela bomba ao fluido de operação:

$$P_h = \frac{\Gamma \cdot H \cdot Q}{3600}$$

**Equação 17:** Potência hidráulica fornecida ao fluido.

- b) A *Equação 18* determina o cálculo da potência elétrica fornecida ao motor para cada valor encontrado na *Equação 17* (potência hidráulica):

$$P_{el} = \frac{P_h}{\eta_b \cdot \eta_m}$$

**Equação 18:** potência elétrica fornecida ao motor.

- c) A *Equação 19* determina o rendimento do motor em função do carregamento do mesmo, sendo este carregamento calculado da seguinte maneira:

$$\gamma = \frac{P_h}{\eta_b \cdot P_{nom}}$$

**Equação 19:** Carregamento do motor.

A partir da *Equação 19* explicitada acima, pode-se calcular o rendimento do motor diante da *Equação 20* a seguir:

$$\eta_m = A \cdot (1 - e^{-a \cdot \gamma})$$

**Equação 20:** Estimativa de rendimento do motor.

Sendo;

$$A = \frac{\eta_{50}^2}{2 \cdot \eta_{50} - \eta_{100}}$$

$$a = -\ln\left(1 - \frac{\eta_{100}}{A}\right)$$

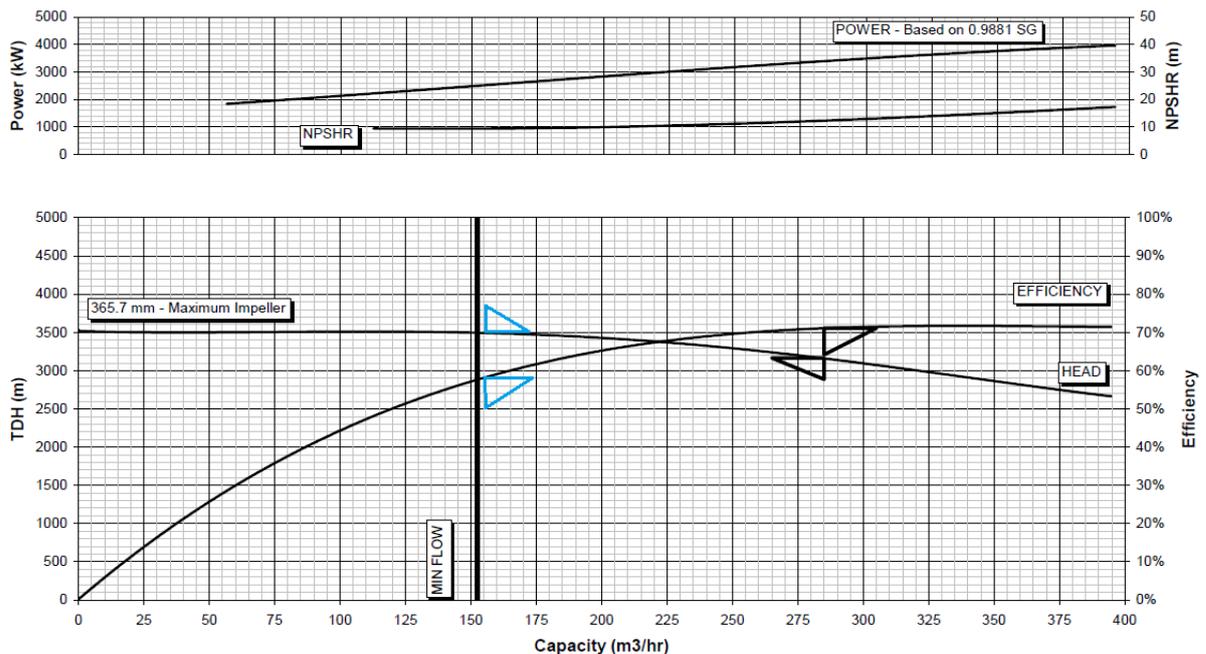
d) A *Equação 21* exemplificada abaixo representa o cálculo do consumo energético total do motor:

$$E_{\text{atual}} = \frac{\Gamma}{3600} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t(i) \cdot Q(i) \cdot H(i)}{\eta_b(i) \cdot \eta(i)}$$

**Equação 21:** Energia total consumida pelo motor no sistema atual.

### 3.4.6. Curvas características da bomba B-0.

O controle de vazão no sistema atual é efetuado através do estrangulamento da linha. Assim, os valores da altura manométrica do sistema atual para as diferentes vazões são obtidos a partir da curva da bomba, uma vez que os pontos de operação se deslocam sobre esta curva.



**Figura 37:** Curvas características da bomba B-0. [7]

A determinação dos valores apresentados na *Tabela 05* foi realizada a partir de pontos coletados na folha de dados da bomba B-0. Sendo assim, para cada vazão obtida pode-se determinar a altura manométrica, potência e o rendimento correspondente, conforme *Figura 37*. É importante alertar que, embora as curvas das bombas presentes nas folhas de dados dos fabricantes sejam traçadas tendo a água como fluido bombeado, neste estudo não houve necessidade de nenhuma correção adicional das mesmas, uma vez que o produto principal para esta ação de descoqueamento é no caso a própria água.

**Tabela 05:** Valores operacionais relacionados às diferentes vazões da bomba B-0.

Vazão (m <sup>3</sup> /h)	AMT (m)	Eficiência (%)	Potência (kW)
285	3.153,20	71	3.397
152	3.498,30	58	2.500

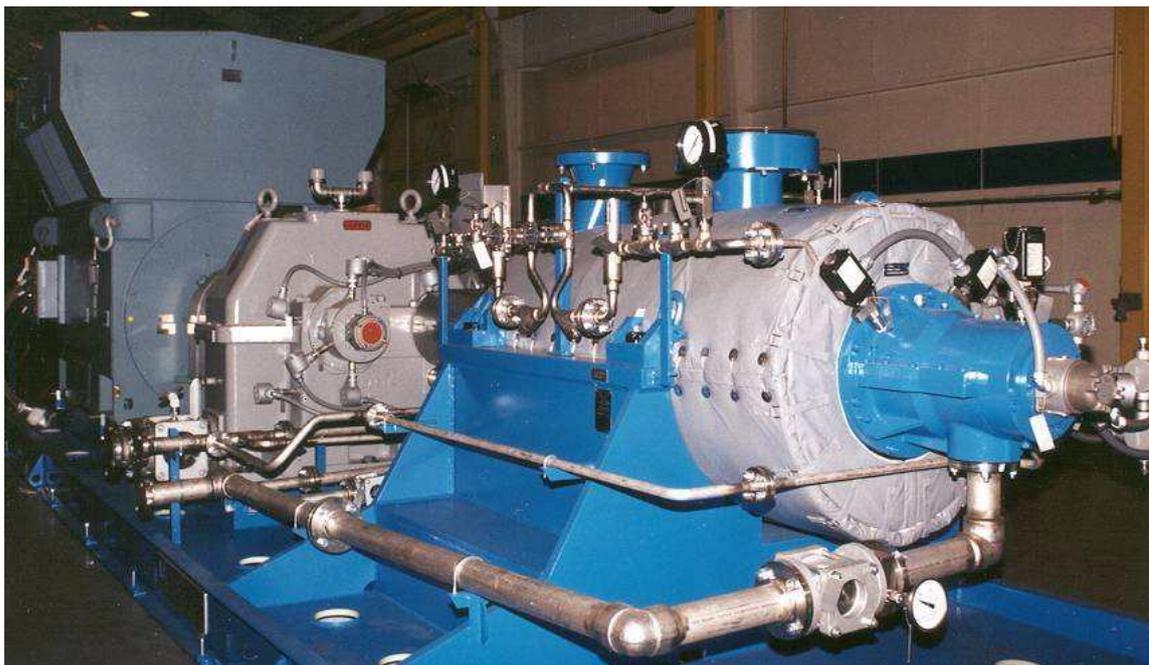
Conforme pode ser observado, durante a maior parte do tempo a vazão solicitada é a vazão de recirculação (152 m<sup>3</sup>/h) que atua a cada 4h em um período de 20h para o ciclo de descoqueamento em cada reator, sendo que, a bomba B-0 atua em tempo integral intercalando as vazões de recirculação e vazão máxima para jateamento.

Com base em informações levantadas em relação ao funcionamento diário do sistema atual, foi calculado o consumo energético da bomba B-0 (Jet Pump), conforme a *Tabela 06*.

**Tabela 06 –** Consumo energético da bomba B-0.

Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Percentual do Tempo	Consumo Energético (KWh)
285	33,34%	1.047.236,98
152	66,66%	1.517.083,83
<b>TOTAL</b>	100%	2.564.320,81

Os cálculos que deram origem aos resultados listados acima estão disponíveis no Apêndice.



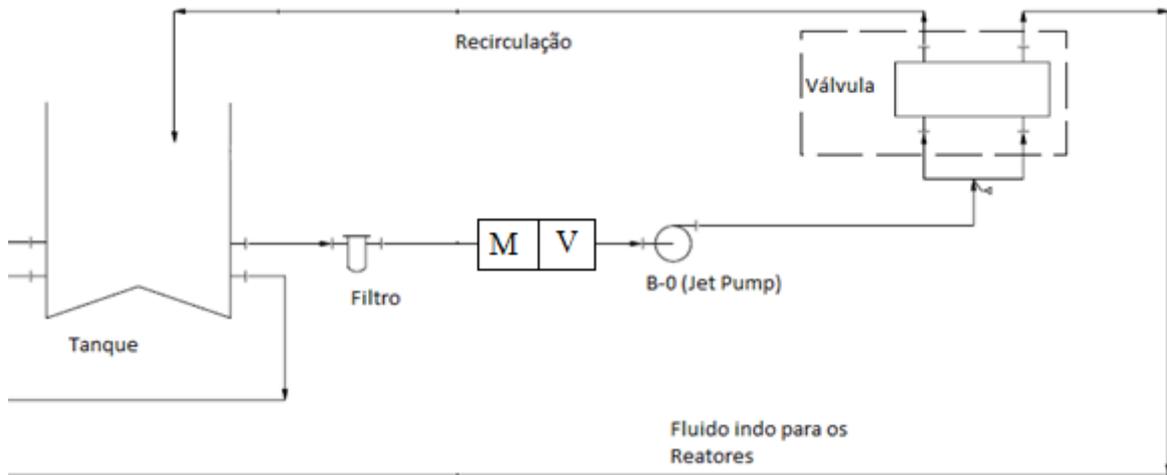
**Figura 38:** Conjunto motor + multiplicador de velocidade + bomba.

### **3.4.7. Descrição do Sistema Proposto**

Com a finalidade de aumentar a eficiência energética do sistema e a qualidade técnica da bomba B-0, objetivo deste estudo, propõe-se a instalação de um variador mecânico entre o motor M-0 e a bomba B-0 de forma a possibilitar a variação da velocidade de rotação da mesma.

O sistema proposto visa diminuir as perdas energéticas e atribuir maior confiabilidade ao conjunto motor + bomba em estudo. Sendo assim, propõe-se a variação da vazão por meio de DVR, para melhor controle do processo de descoqueamento.

Conforme apresentado na *Figura 39*, o sistema passará a ter um variador mecânico entre a bomba B-0 e o motor elétrico M-0. Com isso, a válvula de controle poderá operar totalmente aberta em tempo integral, eliminando totalmente o estrangulamento na linha.



**Figura 39:** Esquemático da bomba B-0 no sistema proposto.

### 3.4.7.1. Critérios para abertura das válvulas de controle

A abertura de uma válvula de controle está inversamente relacionada com a perda de carga na mesma. Deste modo, válvulas de controle muito restringidas resultam em uma alta perda de carga. Conseqüentemente, a potência necessária para operação do sistema é tão maior quanto mais restringida estiver a válvula.

Uma vez que a válvula de controle não será mais utilizada para regulação de vazões entre os casos de recirculação e jateamento no processo de descoqueamento, não será necessário restringir a abertura dessa válvula, sendo assim, maximizando a eficiência energética do sistema.

### 3.4.8. Cálculo do consumo energético do sistema proposto

O consumo energético do sistema proposto pode ser calculado conforme a *Equação 22*.

$$E_{\text{nov}} = \frac{\Gamma}{3600} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t(i) \cdot Q(i) \cdot H(i)}{\eta_b(i) \cdot \eta(i) \cdot \eta_{var}}$$

**Equação 22:** Energia total consumida pelo motor no sistema novo.

Conforme pode ser observado, a *Equação 22* é bastante semelhante à *Equação 21* do consumo energético do sistema atual. A única diferença entre elas é que o sistema proposto

deve levar em conta o rendimento do variador de velocidade. Portanto, os valores de vazão (Q), tempo ( $\Delta t$ ), peso específico ( $\Gamma$ ) e rendimento do motor ( $\eta_m$ ) são os mesmos já apresentados no cálculo do consumo energético do sistema atual. Porém as demais variáveis (altura manométrica e rendimento da bomba) devem ser recalculadas e o rendimento do variador deverá ser levantado, conforme descrição a seguir.

### 3.4.8.1. Altura Manométrica (H)

Para determinação dos valores de H no sistema proposto, é necessário determinar a curva do sistema estudado, o ponto de operação em sistemas regulados por variação de velocidade está sempre sobre a curva do sistema, a qual é fixa.

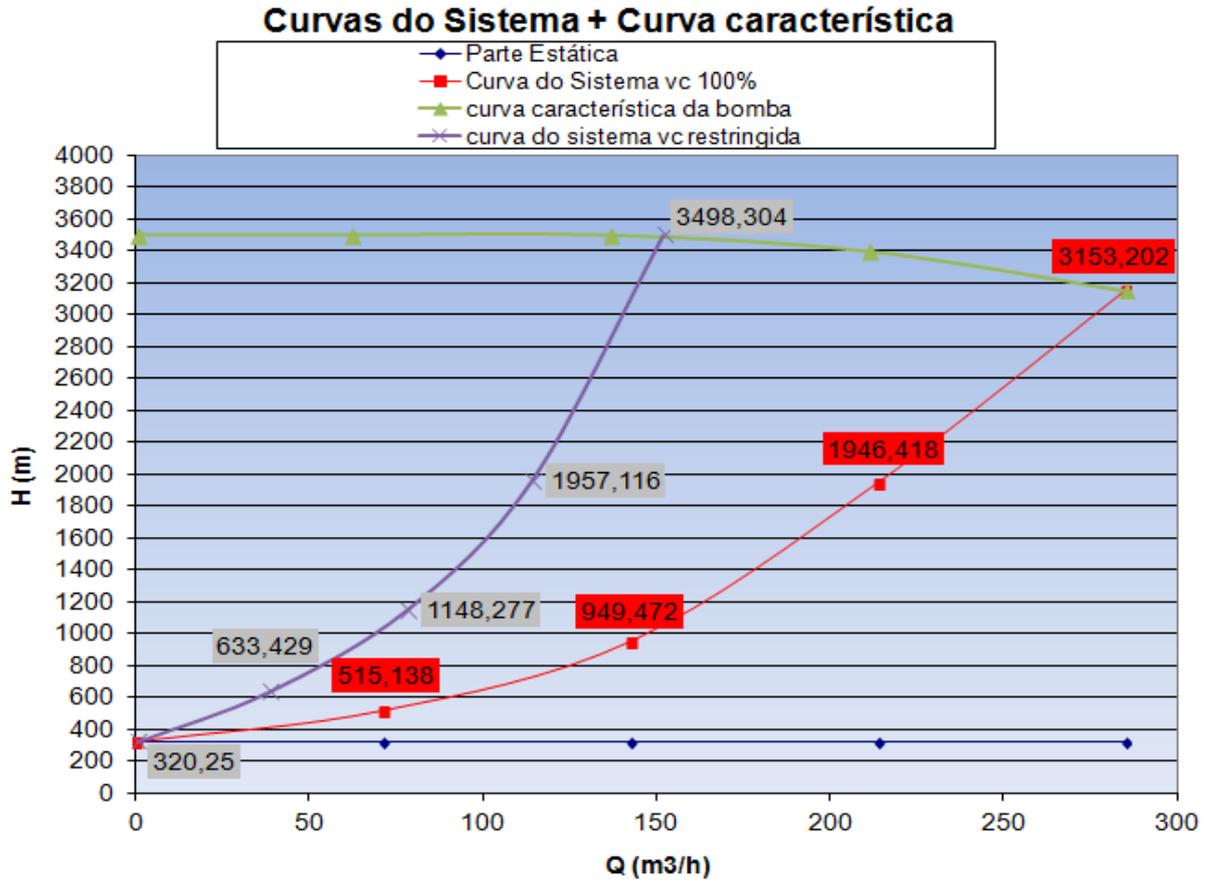
Conforme apresentado no decorrer do projeto, a abertura da válvula de controle deverá ser de 100% com o incremento do variador de velocidade no sistema. Deste modo, a curva do sistema novo não será modificada, já que durante a etapa de descoqueamento a bomba atua com carga máxima, ou seja, 100% da válvula de controle aberta.

- Altura Estática ( $H_e$ )

A altura estática do sistema é determinada pela *Equação 23*. Os parâmetros constituintes da referida equação foram obtidos nas informações dos documentos apresentados para elaboração do projeto.

$$H_e = \left( \frac{P_d - P_s}{\Gamma} \right) + (Z_d - Z_s)$$

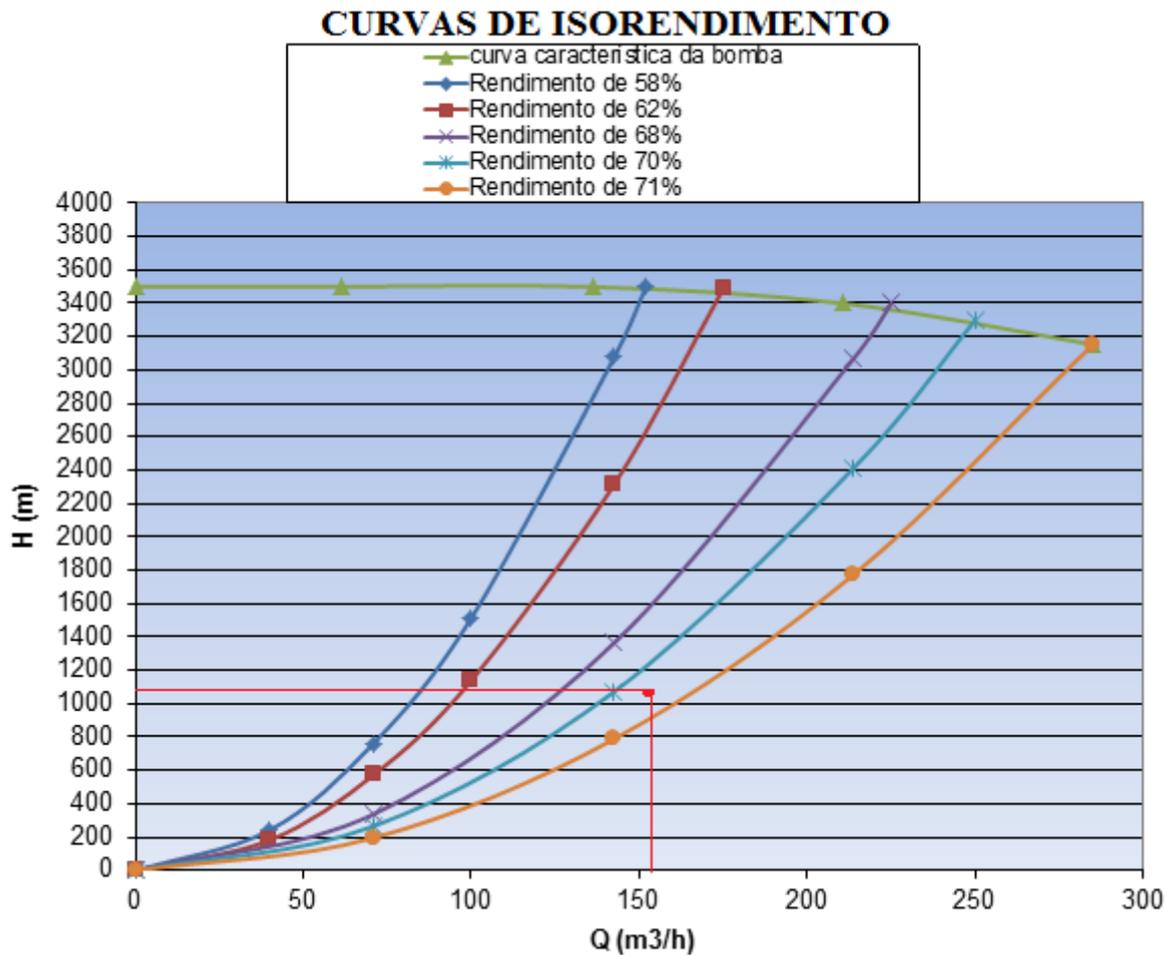
**Equação 23:** altura estática do sistema.



**Figura 40:** Curva característica da bomba e Curvas do Sistema com válvula de controle restringida e 100% aberta.

### 3.4.8.2. Rendimento da Bomba ( $\eta_b$ )

Para o sistema proposto, o rendimento da bomba atuando na recirculação da água foi calculado a partir da aplicação das Leis de Semelhança para a localização dos pontos homólogos (vide item 2.1.7) e o rendimento da bomba atuando no processo de jateamento para descoquear os Reatores permaneceu o mesmo de 71%, pelo fato da bomba neste procedimento funcionar a plena carga. A *Tabela 07* apresenta o rendimento encontrado para a bomba durante a etapa de recirculação, segundo as curvas de isorendimento expressas na figura abaixo.



**Figura 41:** Curvas de Isorendimento.

**Tabela 07:** Rendimento da bomba no sistema proposto.

Vazão ( $m^3/h$ )	Novo Rendimento
152	70,50%

### 3.4.8.3. Rendimento do Variador de Rotação ( $\eta_{var}$ )

O rendimento do variador mecânico utilizado nos cálculos considerou a média de valores típicos apresentados pela VOITH (97%).

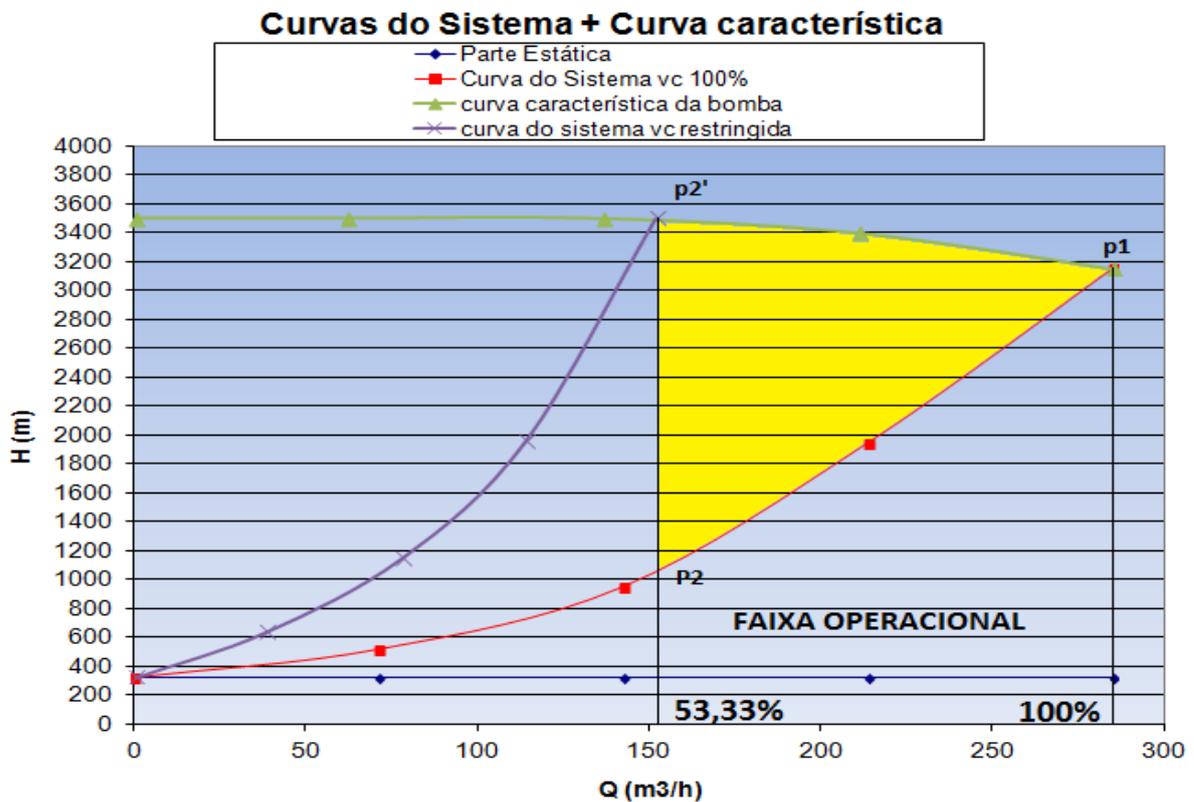
Com base nas informações levantadas, foi calculado o consumo energético do sistema proposto, conforme *Tabela 08* abaixo.

**Tabela 08:** Consumo energético do novo sistema.

Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Percentual do Tempo	Consumo Energético (KWh)	Redução Percentual
285	33,34%	1.079.625,75	-
152	66,66%	386.197,07	-
<b>TOTAL</b>	100%	1.465.822,82	57%

De acordo com a comparação entre as *Tabelas 06 e 08*, pode ser observado uma redução do consumo de energia de aproximadamente 1.098.497,99 KWh/ano ou uma redução percentual equivalente a 57% diante da utilização do variador mecânico.

Em termos gráficos, pode-se representar a redução no consumo energético a partir da *Figura 42*.

**Figura 42:** Esquemático de funcionamento do sistema atual e proposto.

Ao analisar a *Figura 42* acima, segue-se às possíveis conclusões:

- Como atualmente a bomba B-0 não possui o recurso da variação da rotação, o controle de vazão no sistema é realizado pela válvula. Esta regulação ocorre por meio da variação na posição de abertura da válvula, causando o estrangulamento

da linha, conforme descrito no item 3.4.7.1. Os pontos de operação (P1 e P2'), neste caso, são obtidos percorrendo a curva nominal da bomba.

- Uma vez que no sistema proposto a bomba possuirá o recurso da variação de rotação, a válvula de controle não precisará estrangular a vazão e os pontos de operação (P1 e P2) serão obtidos percorrendo a curva do sistema (em vermelho).
- A diferença da potência hidráulica ( $Q \times H$ ) demandada para cada ponto de operação proporciona o aumento da eficiência do sistema proposto em relação ao atual sistema, uma vez que a altura manométrica total para um mesmo valor de vazão é sempre menor no sistema proposto em relação ao atual sistema, e a respectiva diferença entre as AMTs aumenta à medida que a vazão diminui.

É importante ressaltar que para uma vazão de cerca de 53,33% da vazão nominal da bomba, limite inferior da faixa típica de operação, verifica-se que a rotação da bomba será aproximadamente de 2349 rpm.

Conforme foi esclarecido no decorrer do projeto, a operação de funcionamento dos equipamentos conta com um conjunto de motor + DVR + bomba. O uso do variador mecânico instalado entre o motor e a bomba, faz com que a rotação do motor de 1800 rpm permaneça estável durante todo processo de atuação. Contudo é de suma importância alertar que, em caso de implantação de uma solução proposta envolvendo um conjunto de DVR + motor + bomba, deverá ser feito um estudo mais aprofundado de forma a verificar a necessidade de implantação de uma estratégia de controle que utilize um pequeno estrangulamento da válvula de controle em baixas vazões de modo a não ser necessário qualquer mecanismo especial de ventilação para o motor.

## Capítulo 4

### 4. Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica

#### 4.1. Características em ganhos técnicos:

Com a proposta de implantação de um DVR na bomba B-0, os resultados alcançados proporcionam ganhos inimagináveis ao estudo em questão:

- **Aumento na confiabilidade do sistema:** Com o aumento da eficiência hidráulica e a diminuição da potência destrutiva do sistema proposto, os esforços mecânicos sobre a bomba são extremamente reduzidos, permitindo assim, um aumento da confiabilidade dos equipamentos;
- **Redução na demanda de mão de obra:** A redução na demanda de mão de obra é diretamente proporcional ao aumento do tempo médio entre falha dos equipamentos;
- **Redução nos níveis de vibração do conjunto motor-bomba:** Os níveis de vibração dos equipamentos caminham em conjunto com a potência destrutiva, sendo assim, a redução do nível de vibração nos equipamentos pode ser claramente observado conforme a ocorrência de diminuição da potência destrutiva, imposta pelo DVR.
- **Redução de vazamentos no selo mecânico da bomba (Jet Pump):** As possibilidades de vazamento em um selo mecânico, Com a bomba operando a um percentual da pressão de descarga e em uma rotação consideravelmente mais baixa do que na condição de rotação nominal. Aguarda-se assim, um aumento da redução de vazamento pelo selo.

#### 4.2. Características utilizadas para a análise do investimento:

Para a análise do investimento foram consideradas as premissas listadas abaixo:

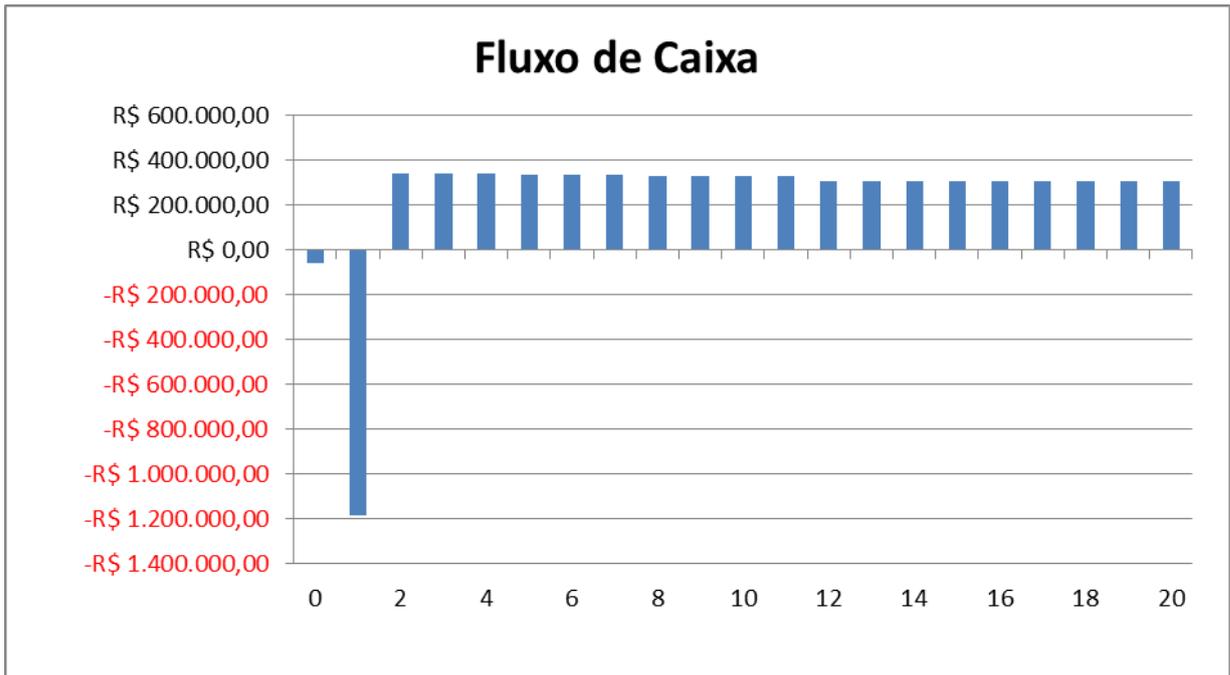
- a) Para o estudo de viabilidade econômica foram considerados todos os valores em reais;
- b) A taxa de atratividade anual (TMA) considerada nesse estudo é de 10%.

- c) O valor de contingência para este estudo foi de 10%.
- d) Para este estudo foi considerado uma depreciação linear no investimento, com o tempo de depreciação de 10 anos.
- e) Foi considerado para o cálculo de depreciação, a inflação anual para taxa de 6,5% no ano de 2011, 6% para o ano de 2012 e 6% a partir do ano de 2013.
- f) O custo estimado de materiais e serviços necessários aos investimentos inclui impostos.
- g) O valor do imposto de renda + CSLL debitado no lucro bruto é de 30%.
- h) O custo da energia elétrica, também foi considerado: 1 MWh = R\$ 292,00.
- i) O fator de conversão entre a energia e o  $CO_2$  fornecido pela empresa é de:  
1 MWh = 0,2 t/ $CO_2$ .
- j) Os valores de serviços e equipamentos apresentados nesse documento devem ser considerados apenas como estimativas quantitativas para fins orçamentais.
- k) A margem de erro estabelecida para as estimativas deste estudo está entre -20% e 20%.
- l) Para este estudo foi considerado disponível o espaço na subestação para a instalação do novo conjunto de equipamentos.

### **4.3. Análise de retorno sobre o Investimento Proposto**

Em relação aos custos e os retornos esperados provindos da instalação da nova solução, realizou-se um estudo de viabilidade econômica para o empreendimento em questão, analisando-se assim, a viabilidade econômica do projeto.

A *Figura 43* representa a elaboração do fluxo de caixa em um prazo de 20 anos para o investimento proposto.



**Figura 43:** Fluxo de caixa do investimento do sistema proposto.

A partir do gráfico apresentado acima na *Figura 45*, pode-se concluir que, o uso do DVR além de apresentar resultados positivos tecnicamente, é ainda uma solução viável economicamente para o empreendimento proposto que possui um Valor Presente Líquido (VPL) de aproximadamente **R\$ 1.347.461,37**, uma taxa interna de retorno (TIR) de **26,13 %** e um Payback Simples de **5 anos e 4 meses**, apresentando-se assim como um investimento de ótima oportunidade. Resultados mais detalhados estão apresentados no apêndice de memória de cálculo.

#### **4.4. Análise da variação do custo de implantação**

Levando em consideração que a nova solução possa sofrer variações no custo da implantação, foi feita uma análise em relação ao comportamento do novo investimento perante possíveis variações no custo de implantação do novo projeto. A *Tabela 09* abaixo apresenta os resultados obtidos.

**Tabela 09:** Variação do custo de implantação.

<b>Custo de Implantação</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR (%)</b>
-20%	R\$ 1.564.649,18	33,11
-10%	R\$ 1.456.055,28	29,23
0%	R\$ 1.347.461,37	26,13
10%	R\$ 1.238.867,46	23,59
20%	R\$ 1.130.273,55	21,47
30%	R\$ 1.021.679,64	19,66
40%	R\$ 913.085,73	18,09
50%	R\$ 804.491,82	16,71

A variação do custo de implantação modifica completamente o resultado do investimento total do empreendimento. Porém em ambos os cenários analisados, o investimento para a nova solução continua economicamente viável, concluindo-se assim que o investimento inicial é robusto levando em consideração uma variação crescente no seu custo de implantação de até metade do seu valor.

## Capítulo 5

### 5. Conclusão

Este estudo de viabilidade técnica-econômica teve como foco a avaliação das condições atuais de operação da bomba B-0, implantada em uma unidade de coqueamento retardado em uma refinaria. Para o estudo foi levado em consideração o regime de operação da bomba envolvendo tempo de trabalho e descanso da mesma, quantificando assim, as perdas energéticas oriundas do controle da vazão por meio do estrangulamento na linha utilizando uma válvula de controle e comparando com uma nova proposta no qual o controle da vazão é realizado por um variador de velocidade.

Conforme desenvolvido neste projeto, a inserção de um DVR no acionamento da bomba B-0 apresenta um considerável aumento da eficiência energética ao substituir o uso de uma válvula de controle, reduzindo assim, as perdas decorrentes do estrangulamento. Além disso, proporciona um significativo aumento no MTBF da bomba, decorrente do maior intervalo entre uma manutenção e outra.

Conforme a metodologia apresentada para o estudo em questão, analisou-se que o ganho energético relacionado com a aplicação da nova proposta, resultará em uma economia de aproximadamente 57%, o que corresponde a uma economia em energia elétrica de aproximadamente 1.098.497,99 KWh/ano, além disso, observou-se uma economia anual em termos de manutenção do equipamento em torno de R\$ 115.845,14, justificando assim, a implantação do variador de velocidade no projeto inicial.

Foi realizado ainda uma análise de sensibilidade em conjunto com o estudo de viabilidade técnica-econômica (EVTE) do novo investimento, mostrando-se viável em todos os cenários analisados.

Conclui-se assim que, os resultados obtidos para este estudo no qual envolveu uma grande bomba em um processo importante de descoqueamento em uma UCR de uma refinaria, abrem portas para inúmeras oportunidades de projetos na área de eficiência energética com grandes possibilidades de redução de perdas energéticas, além da redução de emissões de gases poluentes e da redução nos custos de manutenção.

Caso os resultados do EVTE não fossem satisfatórios, seriam necessários outros estudos, em busca de uma solução melhor que o uso de VC, que podem ser feitos em trabalhos futuros.

## 6. Bibliografia

1. BRAGA, Rafael Poloni. **Inversor de frequência em acionamento de moto bombas com função “Booster”**: Comparativo com outros métodos, análise de investimento e projeto. 2007. 88 f. Projeto final (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Espírito Santo, Vitória.
2. BRANCO, Tadeu da Mata Medeiros, et al. 2009. **Estratégias de Eficiência Energética Aplicadas em Fábrica de Alumínio**: Resultados obtidos. 2009.
3. DE MATTOS, Edson Ezequiel; DE FALCO, Reinaldo. **Bombas Industriais**. 2. ed. Brasil: Interciência, 1998.
4. DOS SANTOS, Fabrício da Silva. **Pré-seleção de bombas para plataformas de petróleo**. 2010. 123 p. Projeto final (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
5. EXPOSIÇÃO DA CONSULTA ECONOMIA POPULAR: VIABILIDADE E ALTERNATIVAS. 1997, Salvador. **Como fazer um estudo de viabilidade técnica e econômica**. CESE-CEADe. Junho de 1997. 14 p.
6. FLOWSERVE. **Sistemas Automatizados de Descoqueamento Hidráulico**. Catalogo. Março de 2013, 2 p.
7. FLOWSERVE. **Hydraulic Decoking system for Petróleo Brasileiro/ Petrobras Comperj**. Catalogo: Flowserve Reference: HS-004-9, RFQ Ref: 96-019/09. Agosto de 2009. 206 p.
8. KASSAI, José Roberto; KASSAI, Silvia; SANTOS, Ariovaldo; NETO, Alexandre Assas. **Retorno de Investimento**: Abordagem Matemática e Contábil do Lucro Empresarial. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2000. 256 p.
9. KSB PUMPS. **Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**. Manual de treinamento: [20--?], 214 p.
10. MINISTÉRIOS DAS MINAS E ENERGIA. 2009. **Balanco Energético Nacional**. 2009.
11. MOTTA, Regis da Rocha; CALÔBA, Guilherme Marques. **Análise de Investimentos: Tomada de Decisão em Projetos Industriais**. São Paulo: Atlas, 2002.
12. OENNING, Roberto. **Análise da viabilidade econômica de um projeto de implantação de variadores de velocidade em bombas centrífugas industriais**.

2011. 91 p. Projeto final (Pós-graduação em Engenharia Industrial) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador.
13. PETROBRAS. **Centrifugal Pump**, I-FD-6000.67-2200-311-WDJ-001. Rio de Janeiro: [20--?], 10 p.
  14. PETROBRAS. 2013, Rio de Janeiro. **Eficiência energética obtida pelos DVR's em sistema de bombeio**. G&E. Abril de 2003. 65 p.
  15. PETROBRAS. **Memorial descritivo do processo**: Unidade de Coqueamento Retardado, MD-5400.00-2200-940-HLL-001. Rio de Janeiro, [20--?], 27 p.
  16. PETROBRAS. **Guidelines for application of centrifugal pumps variable speed drives**, I-ET-6000.67-0000-311-PDY- 001. Technical specification. Rio de Janeiro, 13 p.
  17. RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2006. 2006, Rio de Janeiro. **Como obter um tempo médio entre falhas de dez anos em bombas centrífugas de processo**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP. Setembro de 2006. 8 p.
  18. VOITH. **Guia de Aplicação**: Geared Variable-Speed Couplings. Catálogo: 2º edição. 12 p.

## **7. APÊNDICE:**

### **Memória de Cálculo**

## 7.1. Sumário

<b>1. Cálculo de Ganho Energético.....</b>	<b>1</b>
1.1. Energia Atual.....	1
1.2. Energia Proposta.....	1
1.3. Cálculo do Consumo de Energia do Sistema Atual.....	2
1.4. Cálculo do Consumo de Energia do Novo Sistema.....	2
1.5. Cálculo da Redução do Consumo de Energia.....	2
1.6. Cálculo da Redução de Emissões.....	2
<b>2. Cálculo da Viabilidade Econômica.....</b>	<b>3</b>
2.1. Ganho Relacionado à Redução do Consumo de Energia.....	3
2.2. Ganho Relacionado à Redução dos Custos de Manutenção.....	3
2.3. Tabela de Custos do Empreendimento.....	4
2.4. Cronograma do Empreendimento.....	4
2.5. Fluxo de Caixa.....	5
2.6. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial).....	8
2.7. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial -20%).....	9
2.8. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial -10%).....	10
2.9. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial +10%).....	11
2.10. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial +20%).....	12
2.11. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial +30%).....	13
2.12. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial +40%).....	14
2.13. Estudo de Viabilidade Financeira (Investimento Inicial +50%).....	15

## 1. Cálculo de ganho energético

### 1.1. Energia Atual:

$$E_{\text{atual}} = \frac{\Gamma}{3600} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t(i) \cdot Q(i) \cdot H(i)}{\eta_b(i) \cdot \eta(i)}$$

- Para vazão de 285 m<sup>3</sup>/h:

$$E_{\text{atual}} = \frac{988}{3600} \times \frac{2920 \cdot 285 \cdot 3153,2}{0,71 \cdot 0,967} = 1.047.236,98 \text{ KWh}$$

- Para vazão de 152 m<sup>3</sup>/h:

$$E_{\text{atual}} = \frac{988}{3600} \times \frac{5840 \cdot 152 \cdot 3498,3}{0,58 \cdot 0,967} = 1.517.083,83 \text{ KWh}$$

$$\text{Total} = 11.047.236,98 + 1.517.083,83 = \mathbf{2.564.320,81 \text{ KWh}}$$

### 1.2. Energia Proposta:

$$E_{\text{novo}} = \frac{\Gamma}{3600} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t(i) \cdot Q(i) \cdot H(i)}{\eta_b(i) \cdot \eta(i) \cdot \eta_{var}}$$

- Para vazão de 285 m<sup>3</sup>/h:

$$E_{\text{novo}} = \frac{988}{3600} \times \frac{2920 \cdot 285 \cdot 3153,2}{0,71 \cdot 0,967 \cdot 0,97} = 1.079.625,75 \text{ KWh}$$

- Para vazão de 152 m<sup>3</sup>/h:

$$E_{\text{novo}} = \frac{988}{3600} \times \frac{5840 \cdot 152 \cdot 1050}{0,705 \cdot 0,967 \cdot 0,97} = 386.197,07 \text{ KWh}$$

$$\text{Total} = 1.079.625,75 + 386.197,07 = \mathbf{1.465.822,82 \text{ KWh}}$$

### 1.3. Cálculo do consumo de energia do sistema atual

Vazão (%)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Tempo (%)	Tempo (h/ano)	H (m)	Pot.h (kW)	η Bomba	Pot. M (kW)	Carreg Motor	η motor	Energia (kWh)
53,33	152	66,66	5840	3498,3	145,93	58%	260,19	100%	96,70%	1.517.083,83
100	285	33,34	2920	3153,2	246,63	71%	359,22	100%	96,70%	1.047.236,98

Sendo:

Pot. h - Potência hidráulica fornecida ao fluido;

Pot. M - Potência elétrica fornecida ao motor.

### 1.4. Cálculo do consumo de energia do novo sistema

Vazão (%)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Tempo (%)	Tempo (h/ano)	H (m)	Pot.h (kW)	η Bomba	Pot. M (kW)	Carreg Motor	η motor	Energia (kWh)
53,33	152	66,66	5840	1050	43,8	70,50%	64,25	100%	96,70%	386.197,07
100	285	33,34	2920	3153,2	246,63	71%	359,22	100%	96,70%	1.079.625,75

Sendo:

Pot. h - Potência hidráulica fornecida ao fluido;

Pot. M - Potência elétrica fornecida ao motor.

### 1.5. Cálculo da redução do consumo de energia

- Consumo de energia anual do Sistema Atual: **2.564.320,81 KWh/ano**
- Consumo de energia anual do Sistema proposto: **1.465.822,82 KWh/ano**

Sendo assim, a economia anual total de energia da bomba B-0 é igual a **1.098.497,99 KWh/ano** ou equivalente a **57%** do total.

### 1.6. Cálculo da redução de emissões

Tendo em base a economia anual total de energia (1.098,50 MWh/ano), pode-se assim, estimar a redução das emissões de  $CO_2$  para o ambiente atmosférico.

- Redução de  $CO_2$  para a atmosfera: **219,7 t / ano**

## 2.0. Cálculo de Viabilidade Econômica

### 2.1. Ganho relacionado à redução do consumo de energia

Levando em consideração o valor do MWh fornecido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) para o empreendimento em questão, obtém-se uma estimativa de ganho financeiro anual:

- 1 MWh = R\$ 292,00

Sendo assim, tem-se uma economia anual de **R\$ 320.616,00**.

### 2.2. Ganho relacionado à redução dos custos de manutenção (OPEX)

Bomba	Custos de Manutenção			
	2011	2012	2013	Média
B-0	R\$ 132.648,16	R\$ 186.295,76	R\$ 115.475,33	<b>R\$ 144.806,42</b>

Utilizando-se a média dos custos dos anos de 2011 a 2013 como sendo o custo de manutenção anual e assim, levando em consideração o tempo médio entre falhas de 1 para 5 anos devido à aplicação de um variador de velocidade, conclui-se que:

- Com o aumento do MTBF de 1 para 5 anos, estima-se uma redução de 80% nos custos de manutenção.

Logo, pode-se obter uma economia anual de manutenção equivalente a **R\$ 115.845,14**.

### 2.3. Tabela de custos do empreendimento

Descrição	Custo
Elaboração e desenvolvimento do projeto de engenharia para o sistema proposto	R\$ 60.000,00
Iluminação, cabos elétricos, instrumentação, etc.	R\$ 80.000,00
Equipamentos necessários para a aplicação da solução proposta (motor elétrico, variador mecânico, etc)	R\$ 1.000.000,00
Infra-estrutura necessária para a instalação do DVR (ex: aumento da área de subestação)	R\$ 50.000,00
Serviços para implantação do novo sistema (montagem, configurações, comissionamento do sistema, etc)	R\$ 50.000,00

<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 1.240.000,00</b>
--------------	-------------------------

Nota:

Para o custo de infraestrutura apresentado na tabela acima, foi considerado um valor de R\$ 2.500,00 / m<sup>2</sup>.

## 2.4. Cronograma do Empreendimento

ETAPA	2012												2013											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Projeto	█																							
Equipamentos, acessórios e materiais													█											
Construção e Montagem																			█					

## 2.5. Fluxo de Caixa

	ANO					
	0	1	2	3	4	5
<b>INVESTIMENTO FIXO</b>	R\$ 60.000,00	R\$ 1.298.000,00				
Equipamentos, acessórios e materiais (com impostos)	-	R\$ 1.130.000,00	-	-	-	-
Construção e montagem (com impostos)	-	R\$ 50.000,00	-	-	-	-
Projeto básico	R\$ 60.000,00	-	-	-	-	-
contingências	-	R\$ 118.000,00	-	-	-	-
<b>RECEITA OPERACIONAL</b>	R\$ 0,00	R\$ 58.347,13	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00
Ganho por redução de energia	-	R\$ 58.347,13	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00
<b>CUSTOS FIXOS</b>	R\$ 0,00	-R\$ 89.129,71	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14
Custos por manutenção	-	-R\$ 89.129,71	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14
<b>CUSTOS VARIÁVEIS</b>	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
<b>LUCRO BRUTO</b>	R\$ 0,00	R\$ 147.476,84	R\$ 436.461,14	R\$ 436.461,14	R\$ 436.461,14	R\$ 436.461,14
DEPRECIACÃO DO INVESTIMENTO	-	R\$ 31.877,93	R\$ 119.729,33	R\$ 112.421,91	R\$ 105.560,48	R\$ 99.117,82
IMPOSTO DE RENDA E CONTRIBUIÇÃO SOCIAL	R\$ 0,00	R\$ 34.679,67	R\$ 95.019,54	R\$ 97.211,77	R\$ 99.270,20	R\$ 101.203,00
LUCRO LÍQUIDO	R\$ 0,00	R\$ 80.919,23	R\$ 221.712,27	R\$ 226.827,46	R\$ 231.630,46	R\$ 236.140,33
<b>FLUXO DE CAIXA</b>	<b>-R\$ 60.000,00</b>	<b>-R\$ 1.185.202,83</b>	R\$ 341.441,60	R\$ 339.249,37	R\$ 337.190,94	R\$ 335.258,14

Nota:

A depreciação do investimento calculado refere-se aos anos de 2012 e 2013.

	ANO					
	6	7	8	9	10	11
<b>INVESTIMENTO FIXO</b>						
Equipamentos, acessórios e materiais (com impostos)	-	-	-	-	-	-
Construção e montagem (com impostos)	-	-	-	-	-	-
Projeto básico	-	-	-	-	-	-
contingências	-	-	-	-	-	-
<b>RECEITA OPERACIONAL</b>	R\$ 320.616,00					
Ganho por redução de energia	R\$ 320.616,00					
<b>CUSTOS FIXOS</b>	-R\$ 115.845,14					
Custos por manutenção	-R\$ 115.845,14					
<b>CUSTOS VARIÁVEIS</b>	R\$ 0,00					
<b>LUCRO BRUTO</b>	R\$ 436.461,14					
DEPRECIÇÃO DO INVESTIMENTO	R\$ 93.068,37	R\$ 87.388,14	R\$ 82.054,60	R\$ 77.046,57	R\$ 72.344,20	R\$ 67.928,82
IMPOSTO DE RENDA E CONTRIBUIÇÃO SOCIAL	R\$ 103.017,83	R\$ 104.721,90	R\$ 106.321,96	R\$ 107.824,37	R\$ 109.235,08	R\$ 110.559,70
<b>LUCRO LÍQUIDO</b>	R\$ 240.374,94	R\$ 244.351,10	R\$ 248.084,58	R\$ 251.590,20	R\$ 254.881,86	R\$ 257.972,62
<b>FLUXO DE CAIXA</b>	R\$ 334.242,89	R\$ 331.739,24	R\$ 330.139,18	R\$ 328.636,77	R\$ 327.226,06	R\$ 325.901,44

	ANO					
	12	13	14	15	16	17
<b>INVESTIMENTO FIXO</b>						
Equipamentos, acessórios e materiais (com impostos)	-	-	-	-	-	-
Construção e montagem (com impostos)	-	-	-	-	-	-
Projeto básico	-	-	-	-	-	-
contingências	-	-	-	-	-	-
<b>RECEITA OPERACIONAL</b>	R\$ 320.616,00					
Ganho por redução de energia	R\$ 320.616,00					
<b>CUSTOS FIXOS</b>	-R\$ 115.845,14					
Custos por manutenção	-R\$ 115.845,14					
<b>CUSTOS VARIÁVEIS</b>	R\$ 0,00					
<b>LUCRO BRUTO</b>	R\$ 436.461,14					
DEPRECIÇÃO DO INVESTIMENTO	-	-	-	-	-	-
IMPOSTO DE RENDA E CONTRIBUIÇÃO SOCIAL	R\$ 130.938,34					
<b>LUCRO LÍQUIDO</b>	R\$ 305.522,80					
<b>FLUXO DE CAIXA</b>	R\$ 305.522,80					

Nota:

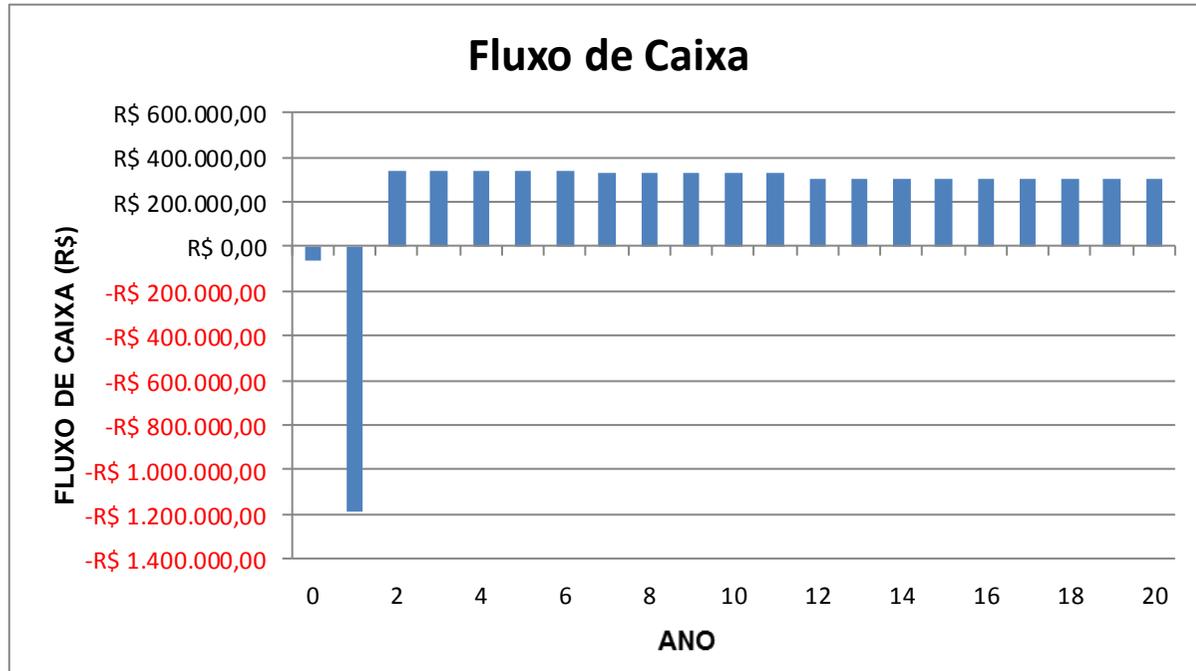
A depreciação do investimento calculado refere-se aos anos de 2012 e 2013.

	ANO		
	18	19	20
<b>INVESTIMENTO FIXO</b>			
Equipamentos, acessórios e materiais (com impostos)	-	-	-
Construção e montagem (com impostos)	-	-	-
Projeto básico	-	-	-
contingências	-	-	-
<b>RECEITA OPERACIONAL</b>	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00
Ganho por redução de energia	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00	R\$ 320.616,00
<b>CUSTOS FIXOS</b>	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14
Custos por manutenção	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14	-R\$ 115.845,14
<b>CUSTOS VARIÁVEIS</b>	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
<b>LUCRO BRUTO</b>	R\$ 436.461,14	R\$ 436.461,14	R\$ 436.461,14
DEPRECIÇÃO DO INVESTIMENTO	-	-	-
IMPOSTO DE RENDA E CONTRIBUIÇÃO SOCIAL	R\$ 130.938,34	R\$ 130.938,34	R\$ 130.938,34
<b>LUCRO LÍQUIDO</b>	R\$ 305.522,80	R\$ 305.522,80	R\$ 305.522,80
<b>FLUXO DE CAIXA</b>	R\$ 305.522,80	R\$ 305.522,80	R\$ 305.522,80

Nota:

A depreciação do investimento calculado refere-se aos anos de 2012 e 2013.

## 2.6. Estudo de Viabilidade Financeira (investimento inicial)

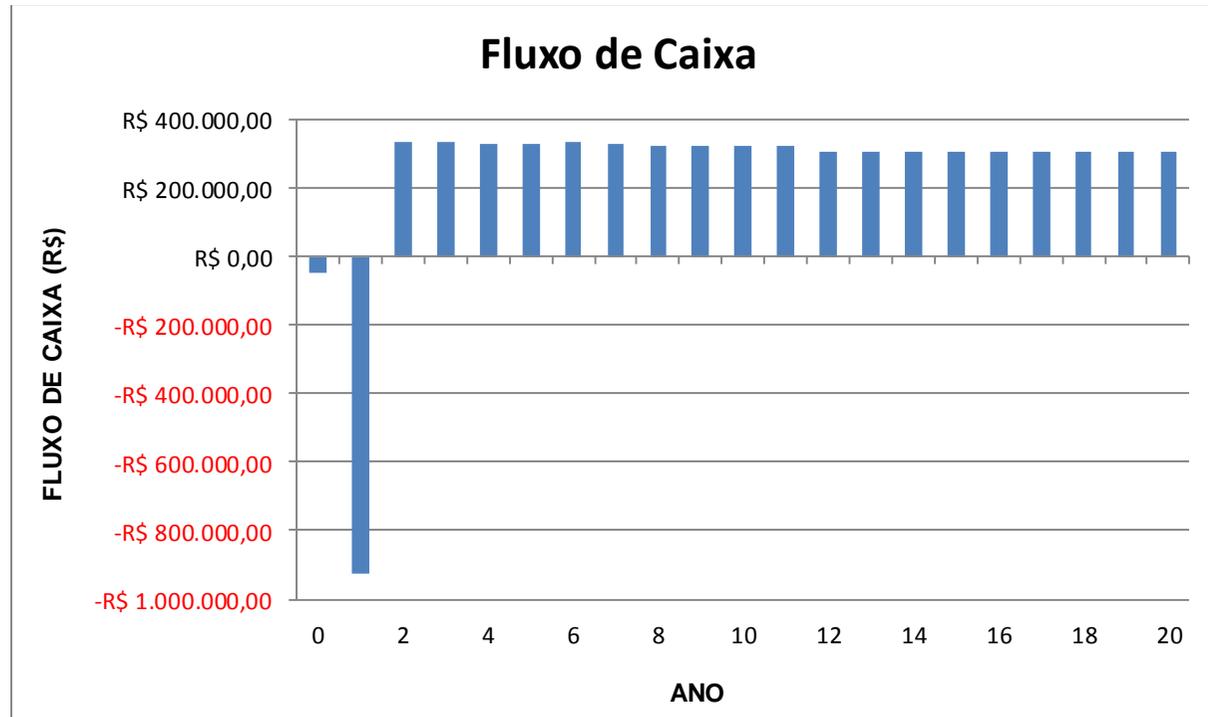


TIR: 26,13%

VPL: 1.347.461,37

Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 60.000,00	-
1	-R\$ 1.185.202,83	-R\$ 1.137.457,12
2	R\$ 341.441,60	-R\$ 855.273,98
3	R\$ 339.249,37	-R\$ 600.390,91
4	R\$ 337.190,94	-R\$ 370.084,96
5	R\$ 335.258,14	-R\$ 161.916,03
6	R\$ 334.242,89	R\$ 26.755,37
7	R\$ 331.739,24	R\$ 196.990,05
8	R\$ 330.139,18	R\$ 351.002,42
9	R\$ 328.636,77	R\$ 490.376,49
10	R\$ 327.226,06	R\$ 616.536,30
11	R\$ 325.901,44	R\$ 730.762,76
12	R\$ 325.522,80	R\$ 828.111,74
13	R\$ 325.522,80	R\$ 916.610,82
14	R\$ 325.522,80	R\$ 997.064,52
15	R\$ 325.522,80	R\$ 1.070.204,25
16	R\$ 305.522,80	R\$ 1.136.694,91
17	R\$ 305.522,80	R\$ 1.197.140,97
18	R\$ 305.522,80	R\$ 1.252.091,93
19	R\$ 305.522,80	R\$ 1.302.047,35
20	R\$ 305.522,80	R\$ 1.347.461,37

## 2.7. Estudo de viabilidade financeira (investimento inicial -20%)

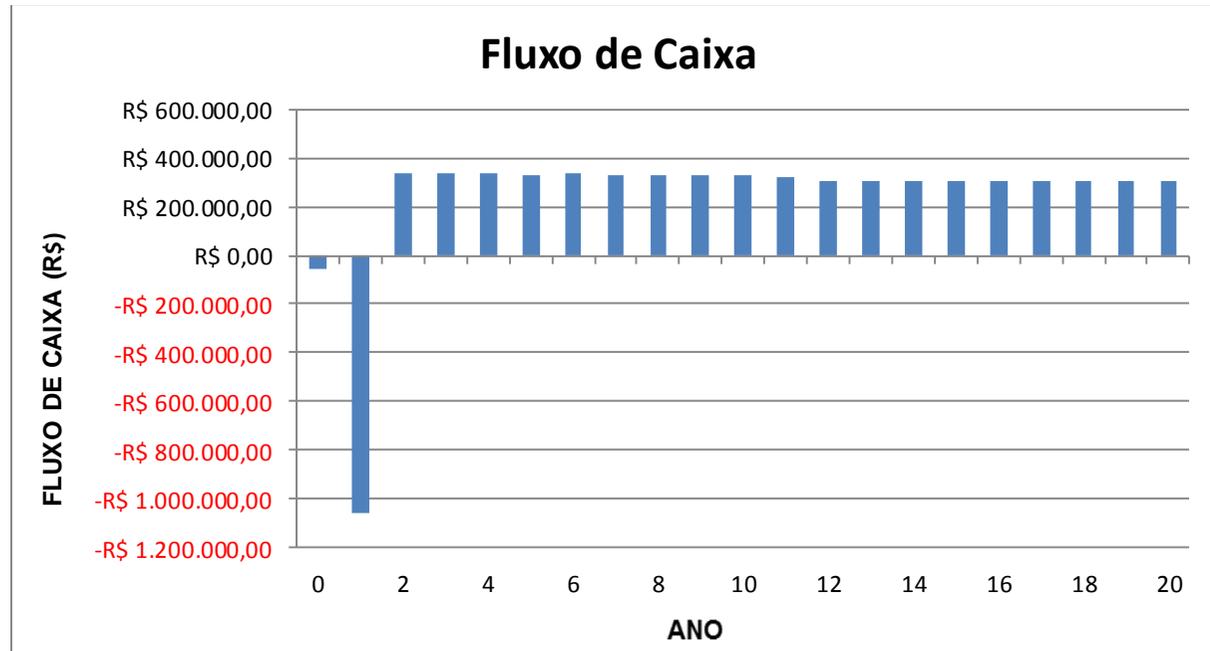


TIR: 33,11%

VPL: R\$ 1.564.649,18

Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 48.000,00	-
1	-R\$ 927.515,51	-R\$ 891.195,92
2	R\$ 334.257,84	-R\$ 614.949,77
3	R\$ 332.504,06	-R\$ 365.134,55
4	R\$ 330.857,31	-R\$ 139.154,56
5	R\$ 329.311,07	R\$ 65.321,71
6	R\$ 334.242,89	R\$ 253.993,11
7	R\$ 326.495,95	R\$ 421.537,16
8	R\$ 325.215,90	R\$ 573.252,78
9	R\$ 324.013,97	R\$ 710.666,33
10	R\$ 322.885,40	R\$ 835.152,63
11	R\$ 321.825,72	R\$ 947.950,58
12	R\$ 305.522,80	R\$ 1.045.299,56
13	R\$ 305.522,80	R\$ 1.133.798,63
14	R\$ 305.522,80	R\$ 1.214.252,34
15	R\$ 305.522,80	R\$ 1.287.392,07
16	R\$ 305.522,80	R\$ 1.353.882,73
17	R\$ 305.522,80	R\$ 1.414.328,79
18	R\$ 305.522,80	R\$ 1.469.279,75
19	R\$ 305.522,80	R\$ 1.519.235,17
20	R\$ 305.522,80	R\$ 1.564.649,18

## 2.8. Estudo de viabilidade financeira (investimento inicial -10%)

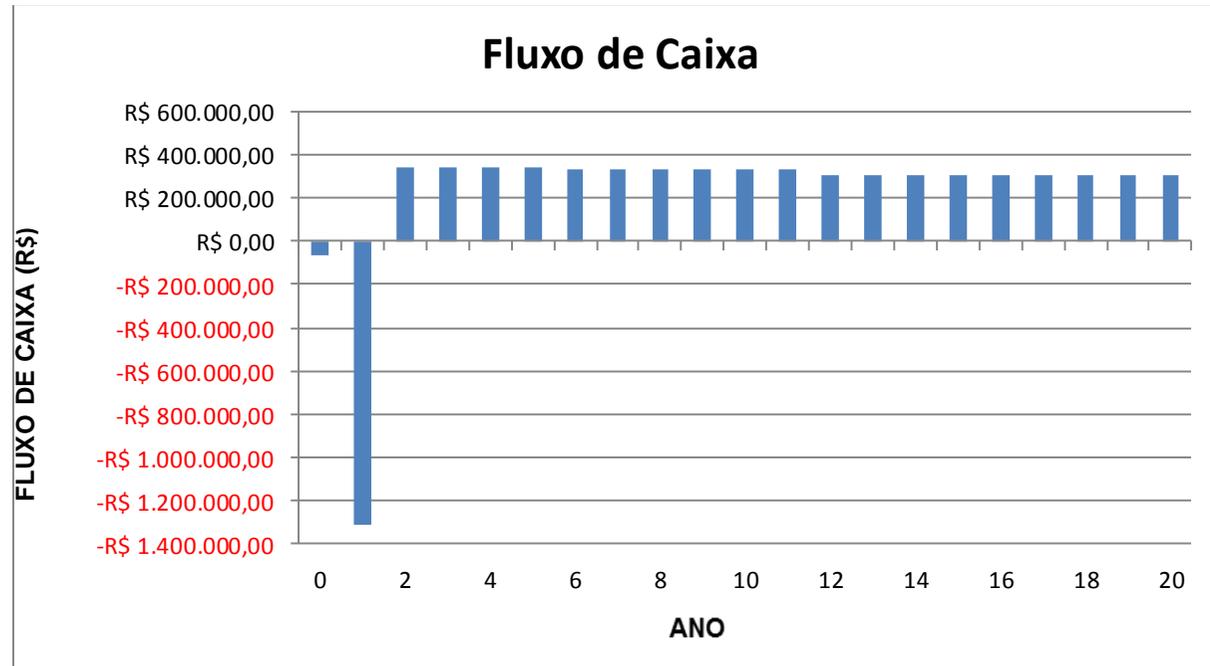


TRI: 29,23%

VPL: R\$ 1.456.055,28

Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 54.000,00	-
1	-R\$ 1.056.359,17	-R\$ 1.014.326,52
2	R\$ 337.849,72	-R\$ 735.111,88
3	R\$ 335.876,71	-R\$ 482.762,73
4	R\$ 334.024,13	-R\$ 254.619,76
5	R\$ 332.284,61	-R\$ 48.297,16
6	R\$ 334.242,89	R\$ 140.374,24
7	R\$ 329.117,60	R\$ 309.263,61
8	R\$ 327.677,54	R\$ 462.127,60
9	R\$ 326.325,37	R\$ 600.521,41
10	R\$ 325.055,73	R\$ 725.844,46
11	R\$ 323.863,58	R\$ 839.356,67
12	R\$ 305.522,80	R\$ 936.705,65
13	R\$ 305.522,80	R\$ 1.025.204,73
14	R\$ 305.522,80	R\$ 1.105.658,43
15	R\$ 305.522,80	R\$ 1.178.798,16
16	R\$ 305.522,80	R\$ 1.245.288,82
17	R\$ 305.522,80	R\$ 1.305.734,88
18	R\$ 305.522,80	R\$ 1.360.685,84
19	R\$ 305.522,80	R\$ 1.410.641,26
20	R\$ 305.522,80	R\$ 1.456.055,28

## 2.9. Estudo de viabilidade financeira (investimento inicial +10%)

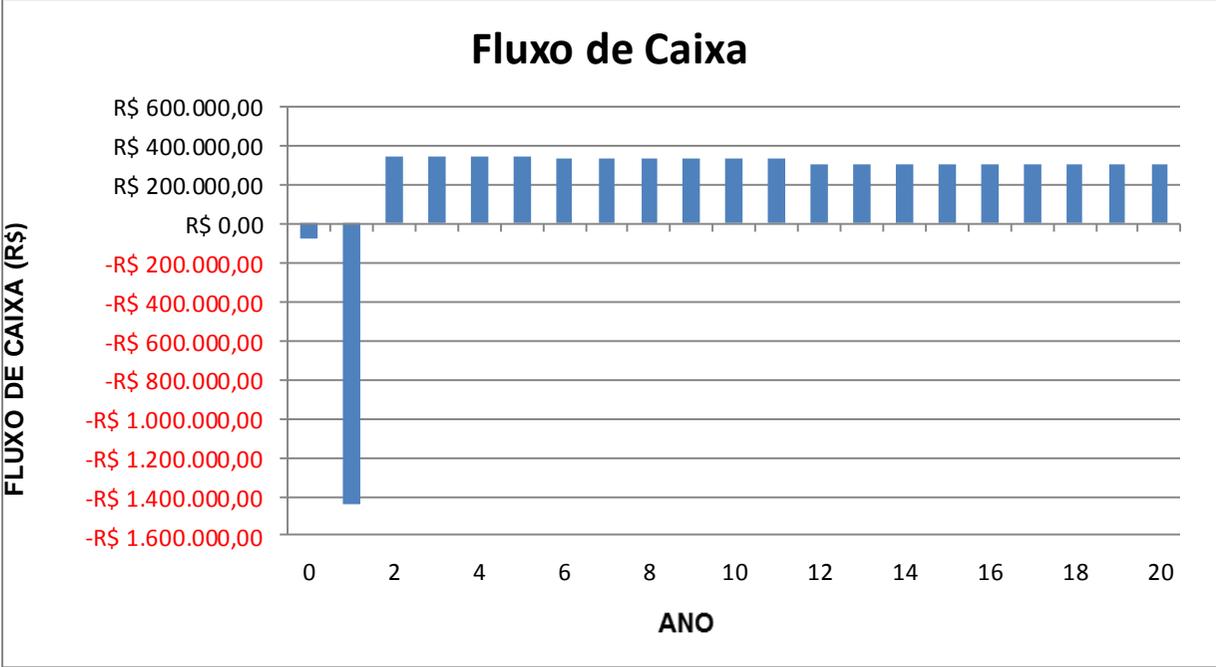


TIR: 23,59%

VPL: R\$ 1.238.867,46

Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 66.000,00	-
1	-R\$ 1.314.046,49	-R\$ 1.260.587,72
2	R\$ 345.033,48	-R\$ 975.436,09
3	R\$ 342.622,03	-R\$ 718.019,09
4	R\$ 340.357,75	-R\$ 485.550,16
5	R\$ 338.231,68	-R\$ 275.534,90
6	R\$ 334.242,89	-R\$ 86.863,50
7	R\$ 334.360,89	R\$ 84.716,50
8	R\$ 332.600,81	R\$ 239.877,23
9	R\$ 330.948,17	R\$ 380.231,56
10	R\$ 329.396,38	R\$ 507.228,13
11	R\$ 327.939,31	R\$ 622.168,86
12	R\$ 305.522,80	R\$ 719.517,84
13	R\$ 305.522,80	R\$ 808.016,91
14	R\$ 305.522,80	R\$ 888.470,61
15	R\$ 305.522,80	R\$ 961.610,34
16	R\$ 305.522,80	R\$ 1.028.101,00
17	R\$ 305.522,80	R\$ 1.088.547,06
18	R\$ 305.522,80	R\$ 1.143.498,02
19	R\$ 305.522,80	R\$ 1.193.453,44
20	R\$ 305.522,80	R\$ 1.238.867,46

**2.10. Estudo de viabilidade financeira (investimento inicial +20%)**

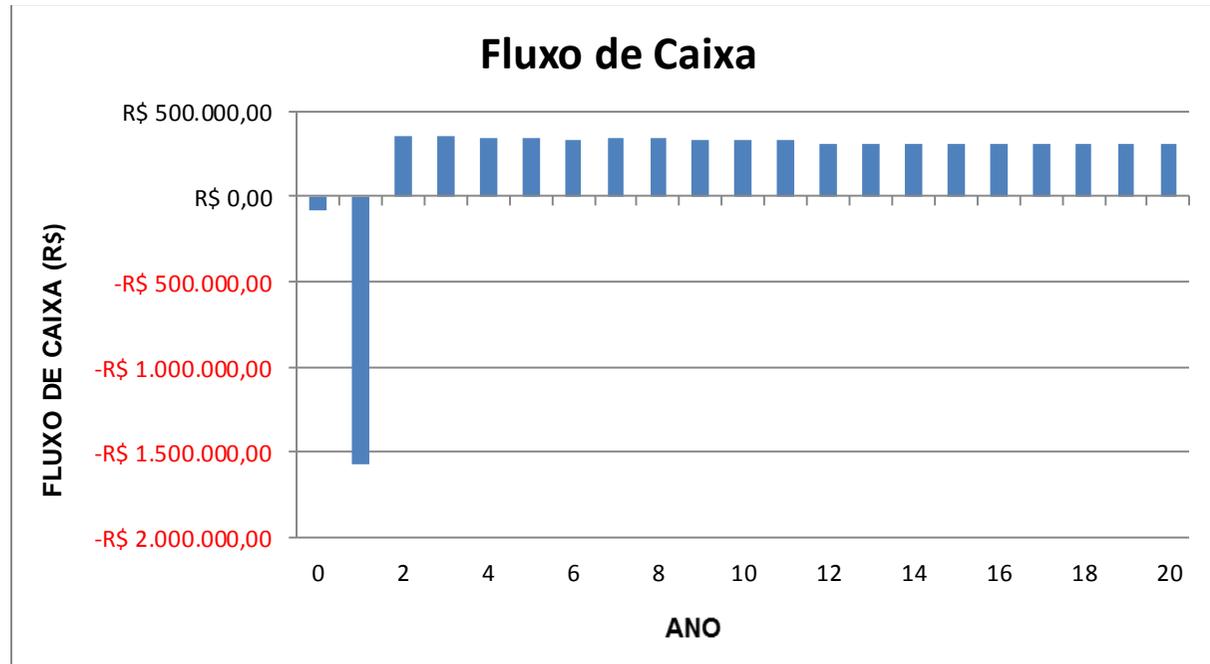


**TIR:** 21,47%

**VPL:** R\$ 1.130.273,55

Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 72.000,00	-
1	-R\$ 1.442.890,16	-R\$ 1.383.718,32
2	R\$ 348.625,36	-R\$ 1.095.598,19
3	R\$ 345.994,68	-R\$ 835.647,27
4	R\$ 343.524,57	-R\$ 601.015,36
5	R\$ 341.205,21	-R\$ 389.153,77
6	R\$ 334.242,89	-R\$ 200.482,37
7	R\$ 336.982,53	-R\$ 27.557,05
8	R\$ 335.062,45	R\$ 128.752,05
9	R\$ 333.259,56	R\$ 270.086,64
10	R\$ 331.566,71	R\$ 397.919,96
11	R\$ 329.977,17	R\$ 513.574,95
12	R\$ 305.522,80	R\$ 610.923,93
13	R\$ 305.522,80	R\$ 699.423,00
14	R\$ 305.522,80	R\$ 779.876,70
15	R\$ 305.522,80	R\$ 853.016,43
16	R\$ 305.522,80	R\$ 919.507,09
17	R\$ 305.522,80	R\$ 979.953,15
18	R\$ 305.522,80	R\$ 1.034.904,11
19	R\$ 305.522,80	R\$ 1.084.859,53
20	R\$ 305.522,80	R\$ 1.130.273,55

## 2.11. Estudo de viabilidade financeira (investimento inicial +30%)

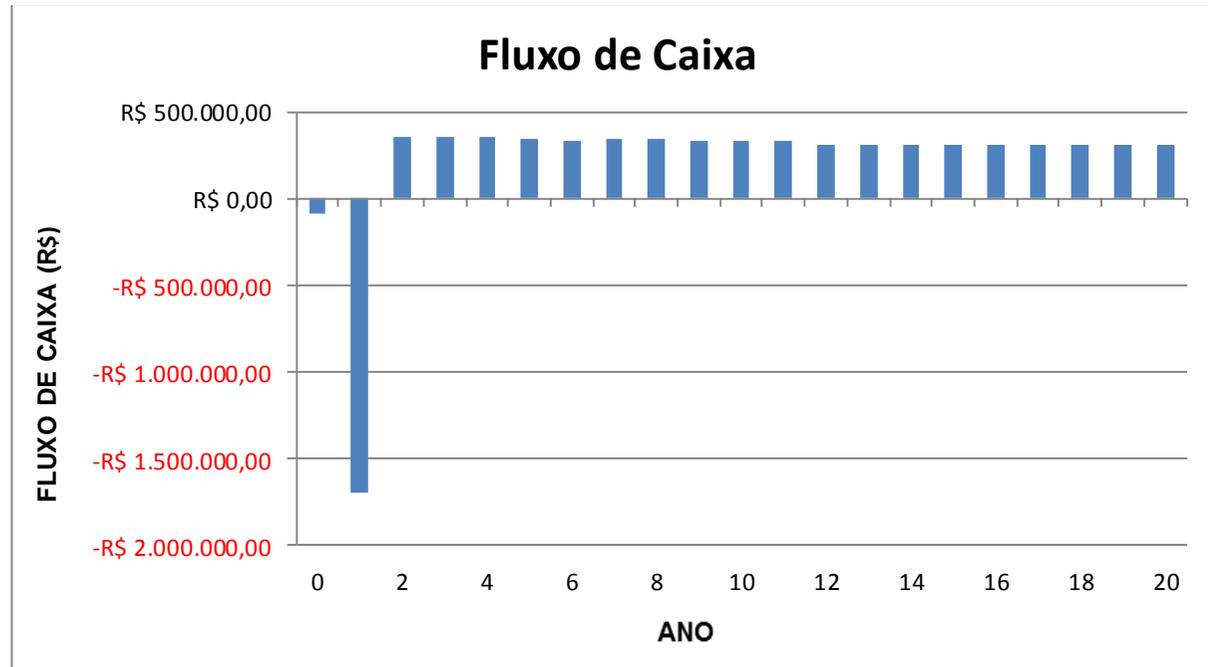


TIR: 19,66%

VPL: R\$ 1.021.679,64

Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 78.000,00	-
1	-R\$ 1.571.733,82	-R\$ 1.506.848,93
2	R\$ 352.217,24	-R\$ 1.215.760,30
3	R\$ 349.367,34	-R\$ 953.275,44
4	R\$ 346.691,38	-R\$ 716.480,57
5	R\$ 344.178,75	-R\$ 502.772,64
6	R\$ 334.242,89	-R\$ 314.101,24
7	R\$ 339.604,17	-R\$ 139.830,61
8	R\$ 337.524,09	R\$ 17.626,87
9	R\$ 335.570,96	R\$ 159.941,72
10	R\$ 333.737,03	R\$ 288.611,79
11	R\$ 332.015,04	R\$ 404.981,04
12	R\$ 305.522,80	R\$ 502.330,02
13	R\$ 305.522,80	R\$ 590.829,09
14	R\$ 305.522,80	R\$ 671.282,79
15	R\$ 305.522,80	R\$ 744.422,52
16	R\$ 305.522,80	R\$ 810.913,18
17	R\$ 305.522,80	R\$ 871.359,24
18	R\$ 305.522,80	R\$ 926.310,20
19	R\$ 305.522,80	R\$ 976.265,62
20	R\$ 305.522,80	R\$ 1.021.679,64

## 2.12. Estudo de viabilidade financeira (investimento inicial +40%)

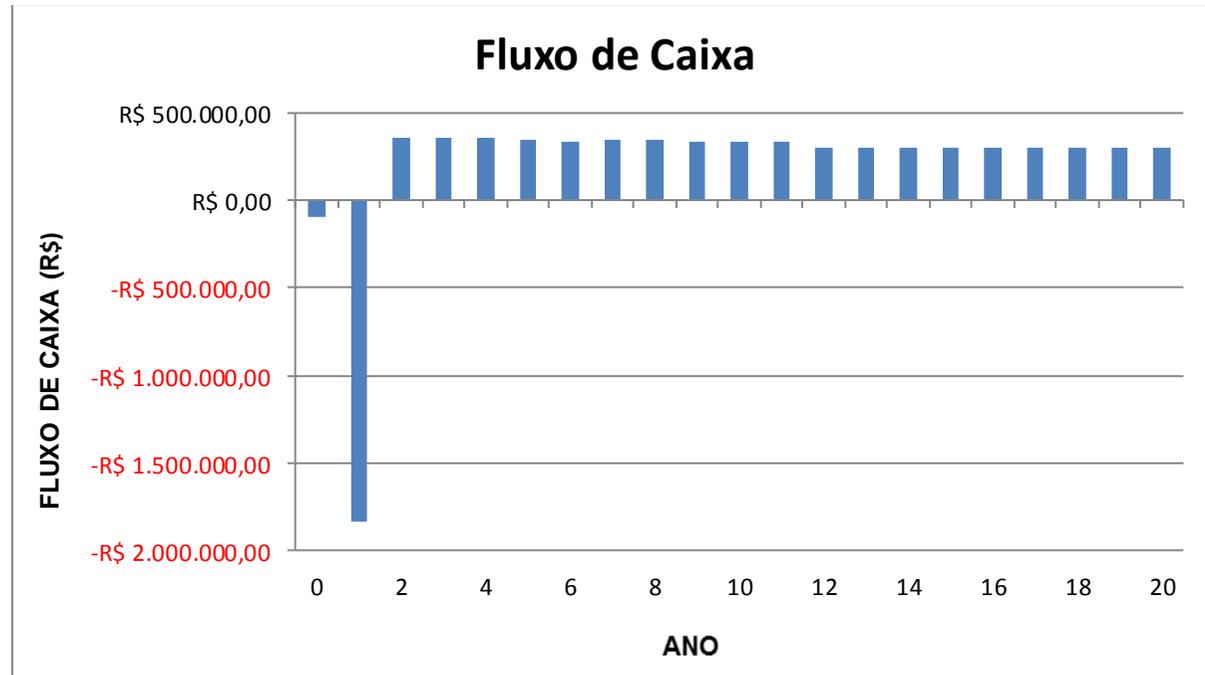


TIR: 18,09%

VPL: R\$ 913.085,73

Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 84.000,00	-
1	-R\$ 1.700.577,48	-R\$ 1.629.979,53
2	R\$ 355.809,12	-R\$ 1.335.922,41
3	R\$ 352.740,00	-R\$ 1.070.903,62
4	R\$ 349.858,20	-R\$ 831.945,77
5	R\$ 347.152,28	-R\$ 616.391,51
6	R\$ 334.242,89	-R\$ 427.720,12
7	R\$ 342.225,82	-R\$ 252.104,16
8	R\$ 339.985,73	-R\$ 93.498,31
9	R\$ 337.882,36	R\$ 49.796,80
10	R\$ 335.907,36	R\$ 179.303,62
11	R\$ 334.052,90	R\$ 296.387,13
12	R\$ 305.522,80	R\$ 393.736,11
13	R\$ 305.522,80	R\$ 482.235,18
14	R\$ 305.522,80	R\$ 562.688,88
15	R\$ 305.522,80	R\$ 635.828,61
16	R\$ 305.522,80	R\$ 702.319,28
17	R\$ 305.522,80	R\$ 762.765,33
18	R\$ 305.522,80	R\$ 817.716,29
19	R\$ 305.522,80	R\$ 867.671,71
20	R\$ 305.522,80	R\$ 913.085,73

### 2.13. Estudo de viabilidade financeira (investimento inicial +50%)



TIR: 16,71%

VPL: R\$ 804.491,82

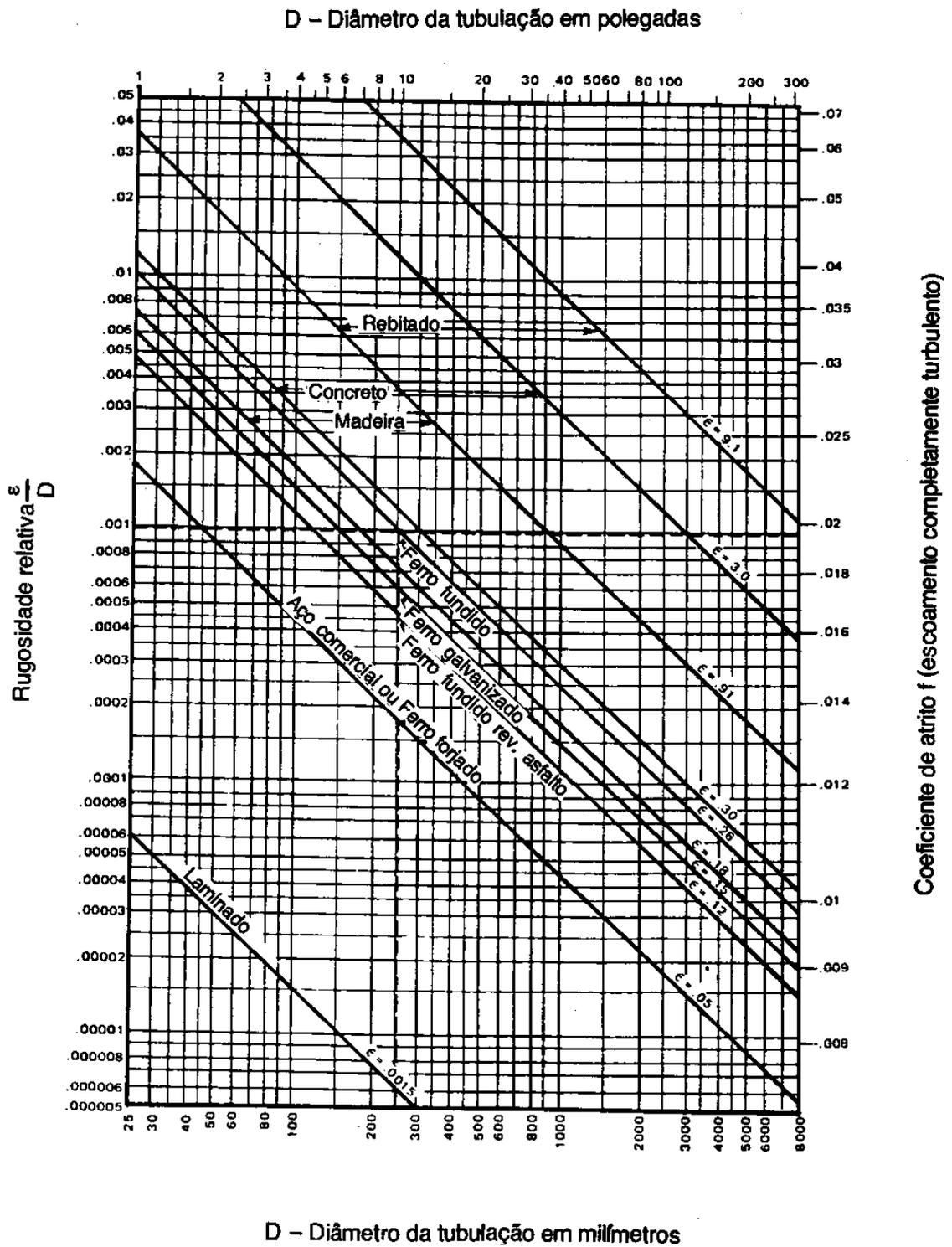
Ano	Fluxo de Caixa	VPL
0	-R\$ 90.000,00	-
1	-R\$ 1.829.421,14	-R\$ 1.753.110,13
2	R\$ 359.401,00	-R\$ 1.456.084,51
3	R\$ 356.112,66	-R\$ 1.188.531,80
4	R\$ 353.025,01	-R\$ 947.410,97
5	R\$ 350.125,82	-R\$ 730.010,38
6	R\$ 334.242,89	-R\$ 541.338,99
7	R\$ 344.847,46	-R\$ 364.377,71
8	R\$ 342.447,37	-R\$ 204.623,49
9	R\$ 340.193,75	-R\$ 60.348,13
10	R\$ 338.077,69	R\$ 69.995,46
11	R\$ 336.090,77	R\$ 187.793,22
12	R\$ 305.522,80	R\$ 285.142,20
13	R\$ 305.522,80	R\$ 373.641,27
14	R\$ 305.522,80	R\$ 454.094,97
15	R\$ 305.522,80	R\$ 527.234,70
16	R\$ 305.522,80	R\$ 593.725,37
17	R\$ 305.522,80	R\$ 654.171,42
18	R\$ 305.522,80	R\$ 709.122,38
19	R\$ 305.522,80	R\$ 759.077,80
20	R\$ 305.522,80	R\$ 804.491,82

## **8. ANEXO**

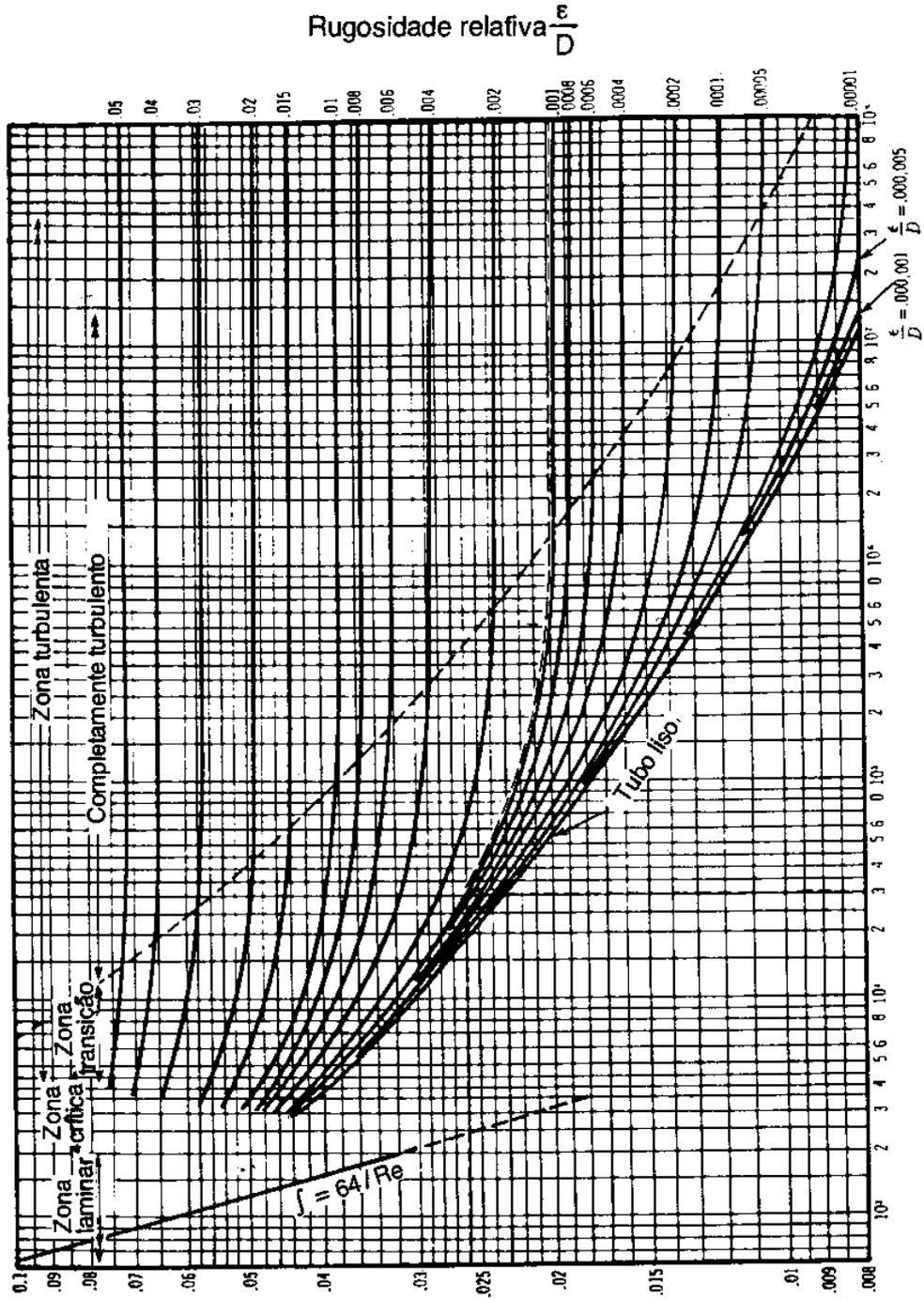
## 8.1. Sumário

Anexo 01 - Rugosidade relativa e coeficiente de atrito.....	1
Anexo 02 - Ábaco de Moody.....	2
Anexo 03 - Comprimento equivalente para acessórios.....	3
Anexo 03-a - Entradas e saídas.....	3
Anexo 03-b - Reduções e ampliações de diâmetro.....	4
Anexo 03-c - Válvulas.....	6
Anexo 03-d - Joelhos, curvas e T's.....	8

Anexo 01 - Rugosidade relativa e coeficiente de atrito. [4]



Anexo 02 - Ábaco de Moody. [4]



Coefficiente de atrito

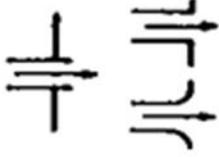
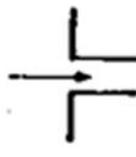
$$f = \frac{h_L}{\left(\frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g}}$$

$$Re = \text{Número de Reynolds} = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

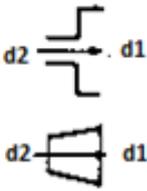
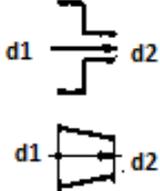
### Anexo 03 – Comprimento equivalente para acessórios

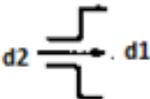
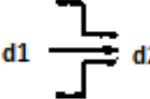
Comprimentos equivalentes em ft – valores entre parênteses em metros.

#### Anexo 03-a – Entradas e saídas

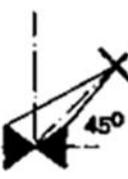
Diâmetro Nominal  (Polegada)	Saídas K=1,0  	Entradas		
		k=0,78  	k=0,5  	k=0,24  
1/2	2 (0,61)	1,5 (0,46)	1 (0,30)	0,5 (0,15)
3/4	3 (0,91)	2,5 (0,76)	1,5 (0,46)	0,75 (0,23)
1	4 (1,22)	3 (0,91)	2 (0,61)	1 (0,30)
1 1/2	7 (2,13)	5,5 (1,68)	3,5 (1,07)	1,75 (0,53)
2	9 (2,74)	7 (2,13)	4,5 (1,37)	2,25 (0,69)
3	15 (4,57)	12 (3,66)	7,5 (2,29)	3,75 (1,14)
4	20 (6,10)	16 (4,88)	10 (3,05)	5 (1,52)
6	36 (10,98)	29 (8,84)	18 (5,49)	9 (2,74)
8	48 (14,63)	38 (11,59)	24 (7,22)	12 (3,66)
10	62 (18,90)	49 (14,94)	31 (9,45)	15 (4,57)
12	78 (23,78)	60 (18,29)	39 (11,89)	19 (5,79)
14	88 (26,83)	70 (21,34)	44 (13,41)	22 (6,71)
16	100 (30,49)	78 (23,78)	50 (15,24)	25 (7,62)
18	120 (36,59)	95 (28,96)	60 (18,29)	30 (9,15)
20	136 (41,46)	107 (32,62)	68 (20,73)	34 (10,37)
24	170 (51,83)	135 (41,16)	85 (25,91)	42 (12,80)

### Anexo 03-b – Reduções e ampliações de diâmetro

Diâmetro Nominal (Polegada)					
		d1	d2	d1	d2
3/4	1/2	0,6 (0,18)	0,5 (8,15)		
1	1/2	1,2 (0,37)	0,7 (8,21)		
	3/4	0,6 (0,18)	0,6 (8,18)		
1 1/2	3/4	1,6 (8,49)	1,8 (8,38)		
	1	1,2 (0,37)	0,9 (8,27)		
2	1	2,2 (0,67)	1,3 (8,40)		
	1 1/2	1,3 (8,40)	1,3 (0,40)		
3	1 1/2	3,8 (1,16)	2,4 (8,73)		
	2	2,7 (0,82)	2,3 (0,78)		
4	2	5 (1,52)	3,2 (0,98)		
	3	3 (0,91)	3 (8,91)		
6	3	8 (2,44)	5 (1,52)		
	4	4 (1,22)	4 (1,22)		
8	4	12 (3,66)	2 (2,13)		
	6	7 (2,13)	7 (2,13)		
10	4	35 (4,57)	8 (2,44)		
	6	14 (4,27)	9,5 (2,90)		
	8	6 (1,83)	6 (1,83)		
12	6	19 (5,79)	12 (2,66)		
	8	14 (4,27)	12 (3,66)		
	10	6,5 (1,98)	6,5 (1,98)		

Diâmetro Nominal (Polegada)		 		 	
		d1	d2	d1	d2
14	6	22 (6,71)	14 (4,27)		
	8	22 (6,71)	14 (4,27)		
	10	15 (4,57)	13 (3,96)		
	12	6 (1,83)	6 (1,83)		
16	8	27 (8,23)	17 (5,18)		
	18	23 (7,01)	17 (5,18)		
	12	15 (4,57)	15 (4,57)		
	14	7 (2,13)	7 (2,13)		
18	18	38 (9,15)	19 (5,79)		
	12	23 (7,81)	19 (5,79)		
	14	15 (4,57)	15 (4,57)		
	16	4 (1,22)	4 (1,22)		
28	12	30 (9,15)	23 (7,01)		
	14	21 (6,48)	19 (5,79)		
	16	13 (3,96)	13 (3,96)		
	18	5 (1,52)	5 (1,52)		
24	16	30 (9,15)	25 (7,62)		
	18	25 (7,62)	25 (7,62)		
	20	12 (3,66)	12 (3,66)		

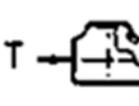
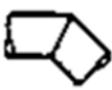
## Anexo 03-c – Válvulas

Diâmetro Nominal (Polegada)	Válvulas Gaveta (abertura total)	Válvulas globo (2) (abertura total)			Válvula de retenção	
					Portinhola	Levantamento
1 1/2	1,75 (0,51)	46 (14,02)	23 (7,81)	18 (5,49)	17 (5,18)	23 (6,10)
2	2,25 (0,69)	60 (18,29)	30 (9,15)	24 (6,52)	22 (6,71)	25 (7,62)
2 1/2	2,75 (0,84)	70 (21,34)	38 (11,59)	30 (9,15)	27 (8,23)	30 (9,15)
3	3,5 (1,87)	90 (27,44)	45 (13,72)	38 (11,59)	35 (10,67)	38 (11,59)
4	4,5 (1,37)	120 (36,59)	60 (18,29)	48 (14,63)	45 (11,72)	50 (15,24)
6	6,5 (1,98)	175 (53,35)	88 (26,83)	72 (21,95)	65 (19,82)	75 (22,87)
8	9 (2,74)	230 (78,12)	120 (36,59)	95 (28,96)	90 (27,44)	100 (30,49)
10	12 (1,66)	280 (85,37)	150 (45,71)	130 (39,61)	120 (36,59)	130 (39,61)
12	14 (4,27)	320 (97,56)	170 (51,83)	145 (44,21)	148 (42,68)	150 (45,73)
14	15 (4,57)	380 (115,85)	190 (57,93)	160 (48,78)	150 (45,71)	170 (51,83)
16	17 (5,18)	420 (128,85)	220 (87,87)	180 (54,88)	170 (51,83)	190 (57,93)
18	18 (5,49)	480 (146,34)	250 (76,32)	285 (62,50)	180 (54,88)	218 (64,82)
20	20 (6,10)	530 (161,59)	298 (88,41)	248 (33,17)	200 (60,98)	240 (73,17)
22	25 (7,62)	580 (176,81)	300 (91,46)	255 (77,74)	240 (73,17)	260 (79,27)
24	32 (9,76)	630 (192,87)	330 (100,61)	270 (82,32)	250 (76,22)	298 (88,41)

Diâmetro Nominal (Polegada)	Válvulas de esfera ou macho (abertura total)	Válvulas de três vias (Área de abertura 60% da área tubo)		Válvula borboleta (abertura total)	Diâmetro Nominal (Polegada)
		Fluxo direto	Fluxo pelo ramal		
1 1/2	2,5 (8,76)	6 (1,81)	20 (6,10)	6 (1,83)	1,5
2	1,5 (1,07)	7,5 (2,29)	24 (7,32)	8 (2,44)	2
2 1/2	4 (1,22)	9 (2,74)	30 (9,15)	10 (3,05)	2,5
3	5 (1,52)	12 (3,66)	36 (10,90)	12 (3,66)	3
4	6,5 (1,98)	15 (4,57)	40 (14,61)	15 (4,57)	4
6	10 (3,85)	22 (6,71)	70 (21,34)	21 (6,40)	6
8	13 (3,96)	30 (9,15)	95 (29,96)	27 (8,21)	8
10	16 (4,88)	38 (11,59)	120 (36,59)	35 (10,67)	10
12	19 (5,79)			40 (12,20)	12
14	20 (6,10)			45 (13,72)	14
16	22 (6,71)			50 (15,24)	16
18	24 (7,12)			58 (17,68)	18
20	23 (8,23)			64 (19,51)	20
12	30 (9,15)			70 (21,34)	12
24	31 (18,06)			78 (23,78)	24
				100 (30,49)	30
				125 (38,11)	36
				145 (44,21)	42
				265 (50,30)	48
				175 (53,36)	52

## Anexo 03-d – Joelhos, curvas e T's

Diâmetro Nominal (in.)	Joelho (3)  90°		Curvas (3)  90°	
	Raio curto R = 1D	Raio longo R = 1,5D	R = 5D	R = 10D
	1 1/2	4,5 (1,37)	3 (0,91)	2,5 (0,76)
2	5,25 (1,68)	3,5 (1,07)	3 (0,91)	5 (1,52)
2 1/2	6 (1,83)	4 (1,22)	3,5 (1,07)	6 (1,83)
3	7,5 (2,29)	5 (1,52)	4 (1,22)	7,5 (2,29)
4	10,5 (3,28)	7 (2,13)	5,5 (1,68)	10 (3,85)
6	15 (4,57)	10 (3,85)	8,5 (2,59)	15 (4,57)
8	21 (6,40)	14 (4,27)	11 (3,35)	20 (6,10)
10	24 (7,32)	16 (4,88)	14 (4,17)	25 (7,62)
12	32 (9,76)	21 (6,40)	16 (4,88)	30 (9,15)
14	35 (10,86)	22 (6,71)	19 (5,79)	33 (10,86)
16	39 (11,98)	26 (7,93)	21 (6,40)	38 (11,59)
18	44 (13,41)	29 (8,84)	24 (7,32)	42 (12,80)
20	48 (14,63)	32 (9,76)	27 (8,23)	50 (15,24)
22	53 (16,16)	36 (10,98)	30 (9,15)	55 (16,77)
24	57 (17,38)	38 (11,59)	32 (9,76)	60 (18,29)
30	75 (22,87)	50 (15,24)	40 (12,20)	75 (22,87)
36	90 (24,44)	68 (18,29)	50 (15,24)	90 (27,44)
42	105 (32,01)	70 (21,34)	56 (17,87)	101 (30,79)
46	120 (36,58)	80 (24,39)	62 (18,900)	120 (36,58)
52	135 (41,15)	90 (27,44)	72 (21,95)	130 (39,63)

Diâmetro Nominal (in.)	 Fluxo pelo ramal	 Fluxo direto	Curvas em gomos		
					
1 1/2	8 (2,44)	3 (0,91)			
2	11 (3,35)	3,5 (1,07)			
2 1/2	13 (3,96)	4 (1,22)			
3	16 (4,88)	5 (1,52)			
4	20 (6,10)	7 (2,13)			
6	30 (9,15)	10 (3,05)			
8	40 (12,20)	14 (4,27)			
10	50 (15,24)	16 (4,88)			
12	60 (18,29)	21 (6,40)	60 (18,29)	30 (9,15)	24 (7,32)
14	65 (19,82)	22 (6,71)	65 (19,82)	34 (10,37)	27 (8,23)
16	75 (22,87)	26 (7,93)	75 (22,87)	38 (11,59)	30 (9,15)
18	86 (26,22)	29 (8,84)	86 (26,22)	42 (12,80)	36 (10,98)
20	100 (30,49)	32 (9,76)	100 (30,49)	50 (15,24)	39 (11,89)
22	118 (33,54)	36 (10,98)	118 (33,54)	56 (17,87)	45 (13,72)
24	120 (36,59)	38 (11,59)	120 (36,59)	60 (18,29)	48 (14,63)
30	155 (47,26)	50 (15,24)	155 (47,26)	76 (23,17)	68 (16,39)
36	180 (54,86)	60 (18,29)	180 (54,86)	96 (29,27)	75 (22,87)
42	210 (64,82)	70 (21,37)	210 (64,82)	108 (32,93)	84 (25,61)
46	250 (76,22)	80 (24,39)	250 (76,22)	120 (36,59)	93 (28,36)
52	260 (79,37)	90 (27,44)	260 (79,37)	140 (42,68)	108 (32,93)