

WAGNER HENRIQUE CARDIAS

ALTERAÇÃO DO CONTROLE DE VAZÃO DE BOMBEIO DE ROTAÇÃO
CONSTANTE PARA ROTAÇÃO VARIÁVEL E IMPACTO NAS EMISSÕES
ATMOSFÉRICAS EM UMA REFINARIA DE PETRÓLEO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

**ALTERAÇÃO DO CONTROLE DE VAZÃO DE BOMBEIO DE ROTAÇÃO
CONSTANTE PARA ROTAÇÃO VARIÁVEL E IMPACTO NAS EMISSÕES
ATMOSFÉRICAS EM UMA REFINARIA DE PETRÓLEO**

WAGNER HENRIQUE CARDIAS

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. SERGIO LUIZ FREY
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. VOLNEI BORGES
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. PEDRO MELLO
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre
2010**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Antonio e Dalva, pela compreensão e apoio nessa caminhada para atingir meus objetivos e realização desse sonho.

ao meu irmão Anderson Felipe, pela amizade e companheirismo durante o enfrentamento das dificuldades desta importante etapa da minha vida.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Smith Schneider* que contribuiu muito através da atenção, paciência e orientação dispensada exemplarmente.

aos colegas e amigos da Refap por muito terem me incentivado e colaborado através de flexibilização dos meus horários de trabalho.

à minha namorada Franciele, pela motivação e apoio nesta reta final do curso.

CARDIAS, W. H. **Alteração do Controle de Vazão de Bombeio de Rotação Constante para Rotação Variável e Impacto nas Emissões Atmosféricas em uma Refinaria de Petróleo.** 40f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Este trabalho avalia o ganho ambiental relativo à redução de emissões atmosféricas que pode ser obtido através da substituição do modo de controle de vazão de um sistema de bombeamento de corrente de hidrocarbonetos da refinaria Alberto Pasqualini REFAP S/A, no município de Canoas, RS. Atualmente o controle de vazão desse fluido é efetuado por válvula de estrangulamento e busca-se o aumento da eficiência energética da instalação pela substituição por um sistema de bombeamento com rotação variável. Para tanto é feito um levantamento das emissões atmosféricas de poluentes e dos gases de efeito estufa (GEE) atuais da refinaria. Posteriormente é selecionada uma estação de bombeamento da refinaria onde o controle de vazão é feito por meio de válvula de estrangulamento. A proposta de controle de vazão baseia-se na modificação do modo de operação da bomba, passando de rotação constante para rotação variável da turbina acionadora acoplada a bomba. O ganho energético é encontrado através do novo consumo de vapor requerido pela turbina para realizar o bombeio com rotação variável. Este novo consumo de vapor é estimado pelas curvas do fabricante da turbina e comparado com valores encontrados através de testes de campo na turbina e aplicação da equação de Schegliaiev. É feito o estudo de viabilidade econômica, avaliando-se o investimento necessário para alteração do modo de controle e a compensação econômica que pode ser obtida, através da redução do consumo de combustíveis gastos para produção de vapor. Finalmente, é avaliado o ganho ambiental no que diz respeito a menor emissão de poluentes e gases de efeito estufa (GEE), devido a menor necessidade de geração de energia na refinaria.

PALAVRAS-CHAVES: Bombeamento com Rotação Variável, Emissões Atmosféricas, Refino de Petróleo.

CARDIAS, W. H. **Alteration of the Control of Flow of I Pump of Constant Rotation for Variable Rotation and Impact in the Atmospheric Emissions in a Refinery of Petroleum.** 2010. 40f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

This work evaluates the relative environmental earnings to the reduction of atmospheric emissions that it can be obtained through the substitution in the way of control of flow of a system of pumping of current of hydrocarbons of the refinery Alberto Pasqualini REFAP S/A, in the municipal district of Canoas, RS. Now the control of flow of that fluid is made by restriction valve and the increase of the energy efficiency of the installation is looked for by the substitution by a pumping system with variable rotation. For so much it is made a rising of the atmospheric emissions of pollutant and of the greenhouse effect gases (GEE) current of the refinery. Later a station of pumping of the refinery is selected where the flow control is made through restriction valve. The proposal of flow control bases on the modification in the way of operation of the bomb, passing of constant rotation for variable rotation of the turbine coupled the bomb. The energy earnings is found through the new steam consumption requested by the turbine to accomplish him/it pump with variable rotation. This new steam consumption is esteemed by the manufacturer's of the turbine curves and compared with values found through field tests in the turbine and application of the equation of Schegliaiev. It is made the study of economical viability, being evaluated the necessary investment for alteration in the control way and the economical compensation that it can be obtained, through the reduction of the consumption of worn-out fuels for steam production. Finally, the environmental earnings is evaluated in what says respect to smallest emission of pollutant and greenhouse effect gases (GEE), due to smaller need of generation of energy in the refinery

KEYWORDS: Pump System with Variable Rotation, Atmospheric Emissions, Petroleum Refine.

SIMBOLOGIA

Letras maiúsculas:

D = diâmetro da tubulação em m

E_p = perda de carga na tubulação de descarga em J/kg

L = comprimento total da tubulação de descarga em m

P = potência em W

Q = vazão de fluido em m³/s

V = velocidade na tubulação em m/s

W = salto entálpico em J/kg

Z_1 = cota da altura vertical da sucção da bomba em m

Z_2 = cota da altura vertical da descarga da bomba em m

Letras minúsculas:

f = fator de atrito¹

g = aceleração da gravidade em m/s²

•

\dot{m} : vazão mássica de vapor na condição real, em kg/s;

•

\dot{m}_N : vazão mássica nominal de vapor que passa pela turbina, em kg/s;

p_{E1} : pressão do vapor na entrada da turbina, em kPa;

p_{S1} : pressão do vapor na saída da turbina, em kPa;

p_{EN} : pressão nominal do vapor na entrada da turbina, em kPa;

p_{SN} : pressão nominal do vapor na saída da turbina, em kPa;

T_{E1} : temperatura do vapor na entrada da turbina, em °C;

T_{EN} : temperatura nominal do vapor na entrada da turbina, em °C;

v_1 = velocidade na tubulação de sucção em m/s

v_2 = velocidade na tubulação de descarga em m/s

Letras gregas:

Δp = variação de pressão em Pa

ρ = massa específica em kg/m³

π = constante pi

ϵ_* : relação crítica entre pressão do vapor na saída e pressão do vapor na entrada da turbina.

¹ O fator de atrito definido pela equação (3) é o fator de atrito de Darcy obtido experimentalmente e publicado por L.F.Moody.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. SISTEMA DE BOMBEIO SELECIONADO	2
4. BOMBEAMENTO COM ROTAÇÃO VARIÁVEL.....	4
4.1. Novas Curvas de Performance da Bomba	4
4.2. Comportamento da Turbina a Vapor	6
5. DESEMPENHO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO	7
6. EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	8
6.1. Poluentes.....	8
6.1.1 SO ₂	9
6.1.2 NO _x	9
6.2. Gases de Efeito Estufa (GEE).....	9
6.3. Levantamento das Emissões Atuais da Refinaria.....	10
6.3.1 Emissões Totais da Refinaria.....	10
6.3.2. Emissões nos Geradores de Vapor.....	10
6.4. Estimativa de Redução das Emissões	11
6.4.1. Redução do Consumo de Vapor Considerado:	11
6.4.2. Fator de emissão de SO ₂ :	11
6.4.3. Fator de emissão de NO _x :.....	12
6.4.4. Fator de emissão de CO ₂ :	13
7. VIABILIDADE ECONÔMICA	13
8. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS	15
ANEXOS	16

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a humanidade passou a se preocupar mais com o meio ambiente. Essa mudança de comportamento é fruto da percepção de que o descaso com as questões ambientais está trazendo danos ao bem estar comum. Entre tais fatores, pode-se citar o aquecimento global que vem causando mudanças climáticas e alterações bruscas em diversas regiões do planeta. A cada ano, aumentam as emissões atmosféricas e, apesar de tecnologias mais limpas estarem sendo implementadas em processos e sistemas, estas ainda têm se mostrado ineficientes para reduzir os níveis de emissões que afetam a qualidade do ar respirável nas grandes cidades e trazem conseqüências danosas a ecossistemas e a saúde humana, (Ugaya e Henschel, 2004).

O setor petrolífero é uma das atividades industriais mais visadas ultimamente pelos órgãos e grupos ambientalistas. Acidentes graves em navios petroleiros, refinarias e dutos de transporte ao longo da história são exemplos de fatos que acarretaram nessa imagem negativa do setor perante a sociedade. Porém alguns impactos ambientais causados pelo setor acontecem de modo contínuo e são gerados em função das características do processo de produção e refino de petróleo, associado ao grande volume de óleo cru processado.

A refinaria Alberto Pasqualini – REFAP S/A, localizada no município de Canoas/RS, região metropolitana de Porto Alegre, produz derivados de petróleo e abastece o estado do Rio Grande do Sul e o oeste catarinense. A capacidade instalada de processamento é de 30.000 m³/dia de petróleo. A quantidade de derivados produzidos varia bastante, dependendo da qualidade do petróleo, dessa forma o atendimento do mercado pode ser flexibilizado por questões comerciais. A REFAP apesar de ter vital importância para a economia da microrregião e do estado gaúcho, precisa estar atenta às questões ambientais para não comprometer o meio ambiente ao redor de suas instalações nem a saúde das pessoas que moram nas proximidades da refinaria. Grandes esforços precisam ser empregados para diminuir os poluentes atmosféricos emitidos e a geração de gases de efeito estufa (GEE) visto que suas atividades envolvem grandes volumes de produtos processados. Nos últimos anos, pesados investimentos foram realizados para modernização do parque de refino, objetivando atender a demanda de derivados de petróleo da região e ao mesmo tempo atender a legislação ambiental que vem diminuindo os limites aceitáveis de emissões atmosféricas. As emissões atmosféricas já foram reduzidas significativamente através de grandes ações no sentido da operação com excelência das unidades de processo projetadas e implantadas para tratar os produtos e gases emitidos. Porém uma redução ainda maior nas emissões pode ser obtida através de ações localizadas e específicas. Somente a excelência operacional da refinaria e a busca contínua por aprimoramento dos processos podem levar a contínua produção dos derivados em harmonia com a preservação ambiental. Mantendo assim um padrão aceitável de sustentabilidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo da última década as preocupações ambientais tem sido motivadoras para inúmeros trabalhos de pesquisa como o aumento de eficiência energética dos processos, reaproveitamento de matéria e energia, redução da poluição gerada por processos e produtos, assim como os efeitos nocivos que as atividades industriais causam no meio ambiente e na saúde das pessoas, especialmente em grandes centros urbanos.

Olim *et al* (2003), apresentam um estudo de caso que descreve o potencial de conservação de energia através de duas propostas aplicadas a uma refinaria de petróleo. Uma solução visa o aproveitamento do calor residual a baixa temperatura, que está contido nas correntes finais do processo de refino, e que é normalmente cedido à água de resfriamento e posteriormente perde-se para atmosfera em torres de resfriamento. Os autores propõem o

reaproveitamento desta energia para geração de frio através de *chillers* de absorção. A outra proposta de conservação de energia consiste na operação de sistemas de bombeamento com rotação variável, de modo a operar sempre com um bom rendimento. Os autores concluíram que estas soluções trazem uma boa economia energética e apresentam viabilidade econômica, mas não chegaram a avaliar o ganho ambiental proporcionado por estas propostas de conservação de energia, o que pode tornar ainda mais atrativa e viável as modificações necessárias no parque de refino.

Chan (2007), em sua dissertação de mestrado sobre a quantificação e redução de gases de efeito estufa (GEE) em refinarias de petróleo, explorou quatro opções de mitigação: aumento de eficiência energética, redução de queima de hidrocarbonetos em tochas de segurança e perdas fugitivas de hidrocarbonetos e mudança para fontes energéticas menos intensivas em carbono e seqüestro de carbono. A indústria de refino de petróleo é uma grande usuária de energia, e a melhoria da eficiência energética é a principal oportunidade de redução de emissões de GEE e redução de custos operacionais. A Petrobras, a Shell e a Chevron estão atuando neste sentido. *Ibid.*, o estudo de caso realizado, descreve projetos futuros para a refinaria estudada, que apresentam um potencial de emissão evitada de 270.000 t CO₂/ano. Porém a instalação de novas unidades para a adequação dos teores de enxofre do diesel e da gasolina resultará na emissão adicional de 208.000 t CO₂/ano. Por isso Chan conclui que o sucesso dos esforços para economizar energia pode ser anulado pelas exigências ambientais para adequação da qualidade dos produtos. E que por isso os governantes das nações devem estabelecer um balanço entre as novas exigências para combustíveis (com impactos locais) e a política de abatimento de CO₂ (impacto global). Essa afirmação é bastante relevante e destaca a importância de se buscar um aumento de eficiência energética nos processos produtivos para viabilizar a redução de poluentes atmosféricos exigidos pelos órgãos ambientais através da legislação ambiental vigente e a licença operacional, sem necessariamente aumentar de maneira significativa a emissão de gases de efeito estufa.

3. SISTEMA DE BOMBEIO SELECIONADO

A demanda de vazão de um dado fluido necessária para um processo muitas vezes é menor do que a capacidade disponível da instalação. Frequentemente, o controle dessa vazão é implementado pela introdução de perdas de carga adicionais ao sistema, através da instalação de válvulas de estrangulamento. Esta alternativa representa um grande desperdício de energia, e certamente é causadora de uma parcela significativa de emissões atmosféricas da refinaria, podendo ser substituída pelo controle variável da rotação das bombas de processos.

Neste trabalho, foi escolhida a bomba denominada B-300016 A/B (A ou B) de RCT (Refluxo Circulante de Topo) da fracionadora principal da unidade de craqueamento catalítico de resíduo (URFCC) da Alberto Pasqualini REFAP S/A. É uma bomba centrífuga horizontal fabricada pela EBARA Corporation. Os dados desta bomba estão listados na [tabela 01](#).

Tabela 01: Dados da Bomba B-300016 A/B

Fluído	RCT – hidrocarboneto médio
Densidade do Fluido (kg/m ³)	800
Temperatura de operação (°C)	142
Vazão normal (m ³ /h) / (m ³ /d)	1248 / 30000
Pressão de sucção (kPa)	382
Pressão de descarga (kPa)	1250
Rotação da Bomba (rpm)	1800

Baseado na vazão de processo dos últimos 100 dias de operação, foi considerada a vazão média de 15.000 m³/d ou 625 m³/h.

A bomba está acoplada a uma caixa redutora que possui relação de transmissão $i=2,447$.

O conjunto rotativo é acionado por uma turbina horizontal a vapor denominada TB300016 A/B (A ou B), que possui características conforme citado na [tabela 02](#).

Tabela 02: Dados da Turbina Acionadora TB-300016 A/B

Potência de eixo de projeto (kW)	350
Pressão Vapor admissão (kPa)	1360
Temperatura Vapor admissão (°C)	240
Pressão Vapor exausto (kPa)	350
Velocidade normal (rpm)	4405
Consumo de Vapor Normal (kg/h)	12500

A turbina possui governador eletrônico que compara o sinal oriundo de dois sensores de rotação com o valor de referência configurado no controlador, enviando um sinal para o atuador eletro-hidráulico que é acoplado diretamente ao eixo da turbina, sendo responsável pelo movimento da válvula reguladora de vapor.

A bomba B-300016A/B possui tubulações de sucção e descarga com as características conforme dados listados na [tabela 03](#).

Tabela 03: Dados Tubulações Sucção e Descarga da B-300016A/B

	Sucção	Descarga
Diâmetro Nominal (polegadas)	26	18
Comprimento (m)	50	350
Nº Curvas 90°	6	30
Nº Válvulas Gaveta (Bloqueios)	2	8
Nº Válvulas Retenção (check valve)	0	1

Os comprimentos equivalentes dos elementos e válvulas da tubulação são listados na [tabela 04](#), conforme Fox&McDonalds, 2001.

Tabela 04: Comprimentos Equivalentes LE de Elementos e Válvulas

	Nº elementos	LE/D	LE total (m)
Curvas 90°	34	30	466
Válvulas Gaveta (Bloqueios)	8	8	30
Válvulas Retenção (check valve)	1	55	25

Portanto, o comprimento total da tubulação de descarga é a soma do comprimento da tubulação com os comprimentos equivalentes totais devido os elementos presentes. E neste caso específico o comprimento total é de 871m.

Para obtenção do fator de atrito f através do diagrama de Moody², foi feito o cálculo do número de Reynolds (Re) pela equação 09, através das seguintes considerações e arbitrariedades (Fox & McDonald, 1998):

- Viscosidade dinâmica do fluido RCT: $\mu = 0,0006$ N s/m² (viscosidade dinâmica do querosene@120°C conforme Fox & McDonald 2001)
- Rugosidade do aço carbono da tubulação: $e = 0,046$ mm (aço comercial)

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (09)$$

Assim, foi obtido um número de Reynolds (Re) de 430.000 e fator de atrito f de 0,015.

² Diagrama de Moody para fator de atrito em escoamento completamente desenvolvido em tubos circulares.

A altura de bombeio é 30m de altura, desde a bomba até a entrada na torre fracionadora.

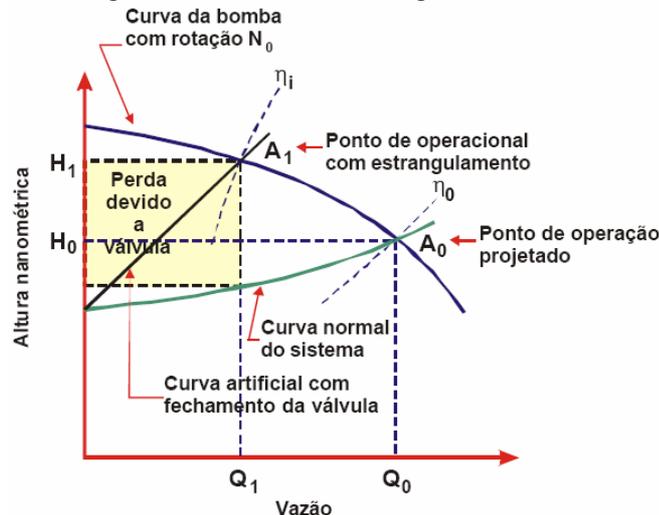
Existe ainda no sistema um trocador de calor denominado P-300020 com a finalidade de resfriar a corrente de RCT. Este trocador pode estar parcialmente desviado durante a operação do sistema, controlando a temperatura conforme a necessidade do processo. Dessa forma a perda de carga imposta pelo mesmo é dependente não somente da vazão que escoar pelo seu interior, como também da condição do processo. Por isso para estimar a perda de carga média imposta ao sistema foi considerado a diferença de pressão média durante 100 dias de operação, correspondente a 80kPa, conforme medição por manômetro de campo.

4. BOMBEAMENTO COM ROTAÇÃO VARIÁVEL

A operação do sistema de bombeamento com rotação diferente daquela de projeto requer a estimativa do comportamento da bomba e do equipamento acionador para essa nova situação. A metodologia empregada para construir as novas curvas de performance da bomba e da turbina a vapor acoplada é apresentada a seguir.

4.1. NOVAS CURVAS DE PERFORMANCE DA BOMBA

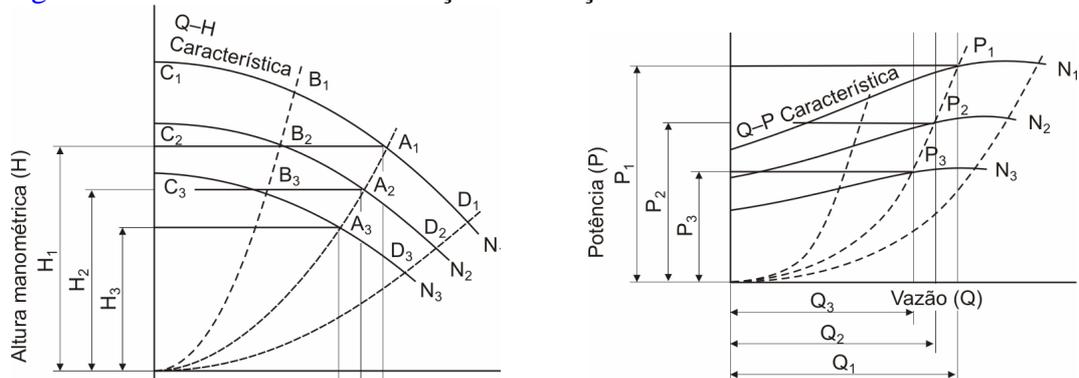
A [Figura 01](#) mostra a perda de carga adicional imposta ao sistema para controle de vazão e o desperdício de energia devido a esta estratégia de controle.



[Figura 01](#): Perda de carga devido a válvula de estrangulamento

Pode-se perceber a região amarela da figura que representa a energia perdida pela válvula de estrangulamento que está modificando a curva original do sistema. Uma alternativa bastante eficiente é o controle por rotação da bomba, que levará a um comportamento diferente do equipamento, com vazão, altura manométrica e eficiência modificadas.

A [Figura 02](#) mostra o efeito da variação de rotação no funcionamento de bombas.



[Figura 02](#): Bombeamento com rotação variável.

Pode-se perceber que alterando-se a rotação da bomba, consegue-se a mesma vazão com eficiência diferente e com menor potência transferida ao fluido no caso de uma rotação menor. Segundo Henn (2006), de acordo com as leis de similaridade ou leis de semelhança, existe uma proporcionalidade entre a rotação e características tais como variação de entalpia, vazão e potência de uma máquina de fluxo. Por isso uma variação na rotação da máquina faz com que haja o deslocamento da sua curva característica, dando origem a um conjunto de curvas congruentes, conforme pode ser visto no gráfico altura manométrica X vazão e potência X vazão da figura 02. Essas curvas unem os pontos teoricamente de mesmo rendimento e, segundo o mesmo autor, os valores obtidos pela aplicação das leis de semelhança apresentam boa aproximação com os valores reais.

Dessa forma, a partir da curva de performance da bomba fornecida pelo fabricante, para a rotação constante de 1800rpm, (ver [anexo A](#)), podem ser elaboradas novas curvas de performance para diversas diferentes rotações de trabalho. Baseando-se nas leis de semelhança citadas por Henn (2006), através da equação 1 calcula-se a altura manométrica com mesmo rendimento, para cada nova rotação. Já a partir da equação 2 calcula-se a vazão com mesmo rendimento para cada nova rotação. Podendo-se assim montar um mapa de curvas com pontos de isorendimento para as rotações arbitradas.

$$\frac{H}{H'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{Q}{Q'} = \left(\frac{n}{n'}\right) \quad (2)$$

Onde H é altura manométrica em m, Q é a vazão em m³/s e n é a rotação em rpm.

Na análise da viabilidade técnica e econômica de um sistema operando com rotação variável, onde a vazão requerida pelo processo não é constante, torna-se necessário arbitrar uma vazão média de trabalho.

Para determinação da altura manométrica H necessária para a realização do bombeio, calcula-se a energia específica W que deve ser transferido ao fluido para vencer a resistência imposta pelo sistema e manter a vazão requerida. A energia específica W é equivalente a perda de carga E_p . Para tanto se utilizou a equação 3, denominada equação da conservação de energia com perdas, segundo Fox e McDonald, 2001.

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + g Z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + g Z_2\right) = E_p = W \quad (3)$$

Onde P é a pressão em Pa, ρ é a massa específica em kg/m³, V é a velocidade do escoamento em m³/s, Z é a cota em m, g é a aceleração da gravidade em m/s², α é o coeficiente de energia cinética adimensional e normalmente igual a 1 para escoamentos em tubos, e W é a energia específica transferida ao fluido em J/kg.

A energia específica transferida ao fluido é o produto da aceleração da gravidade g em m/s² pela altura manométrica H em m.

A perda de carga E_p da tubulação foi obtida a partir da equação 4, denominada equação de Darcy, segundo Fox e McDonald, 2001:

$$E_p = f \frac{8L}{\pi^2 D^5} Q^2 \quad (4)$$

Onde L é o comprimento equivalente em m, D é o diâmetro em m, Q é a vazão em m³/s, f é o fator de atrito adimensional e E_p é a perda de carga total por unidade de massa em J/kg.

A potência transferida ao fluido P , foi calculada a partir da equação 5, (Henn, 2006):

$$P = \rho Q W \quad (5)$$

Onde P é a potência transferida ao fluido em Watts, ρ é a massa específica em kg/m³, Q é a vazão em m³/s e W é a energia específica transferida ao fluido em J/kg.

A potência de eixo da bomba pode ser calculada pela equação 6, a partir da eficiência η do equipamento operando na nova rotação. Esta eficiência η é obtida através do mapa de performance elaborado a partir da aplicação das leis de semelhança ou leis de similaridade.

$$P_e = \frac{P}{\eta} \quad (06)$$

Onde P_e é a potência de eixo em Watts, P é a potência transferida ao fluido em Watts e η é a eficiência adimensional.

A partir da vazão média considerada de 625m³/h e da altura manométrica H calculada para a realização do bombeio, pode-se definir a nova rotação necessária para operação da bomba, através do mapa de performance. Para verificação dos resultados obtidos de potência de eixo da bomba pode-se comparar com as curvas de performance fornecida pelo fabricante da bomba de testes realizados em outras rotações diferentes da rotação nominal.

4.2. COMPORTAMENTO DA TURBINA A VAPOR

Tendo-se chegado a rotação e potência de eixo da bomba pelo mapa de curvas de performance e equação 6 respectivamente, a rotação e potência de eixo da turbina acionadora podem ser obtidas a partir da relação de transmissão e eficiência da caixa redutora que faz o acoplamento entre bomba e turbina.

Com a potência de eixo e nova rotação da turbina, a redução do consumo de vapor pode ser estimado, através de informações fornecidas pelo fabricante, ou através de testes de campo e aplicação da equação 7, denominada equação de Schegliaiev:

$$\dot{m} = \dot{m}_N \sqrt{\frac{(p_{E1}^2 - p_{S1}^2) - \sigma(p_{E1} - p_{S1})^2}{(p_{EN}^2 - p_{SN}^2) - \sigma(p_{EN} - p_{SN})^2}} \sqrt{\frac{T_{EN}}{T_{E1}}} \quad (7)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica de vapor que passa pela turbina na condição real em kg/s, \dot{m}_N é a vazão mássica nominal de vapor que passa pela turbina na condição de projeto em kg/s, p é a pressão do vapor na entrada e saída da turbina nas condições reais e de projeto em kPa, T é a temperatura do vapor nas condições reais e de projeto em °C e σ é um número adimensional obtido pela equação 8:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_*}{1 - \varepsilon_*} \quad (8)$$

Onde ε_* é a relação crítica entre pressão do vapor na saída e pressão do vapor na entrada da turbina, e é obtido pela equação 9:

$$\varepsilon_* = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}} \quad (9)$$

Após a obtenção da vazão mássica de vapor de média pressão economizado na turbina para a realização do bombeio com rotação variável, estima-se a redução do consumo de vapor de alta pressão pelo exausto e extração de turbinas de grande porte da refinaria que possuem vapor de alta pressão na admissão e vapor de média pressão no exausto. Essas turbinas apresentam rendimento conforme citado na equação 08, (Bran, 1969):

$$\eta = \frac{h_{AP} - h_{MP_{real}}}{h_{AP} - h_{MP_{isentrópico}}} \quad (08)$$

Onde η é a eficiência adimensional da turbina, h_{AP} é a entalpia do vapor de alta pressão em kJ/kg, h_{MP} é a entalpia do vapor de média pressão em kJ/kg.

Dessa forma pela relação de entalpias e rendimento das turbinas de onde é extraído o vapor de média, chega-se ao novo valor da vazão mássica de vapor de alta pressão, e dessa forma pode-se estimar o ganho ambiental pela menor necessidade de queima de combustíveis nos geradores de vapor.

5. DESEMPENHO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

A aplicação das leis de variação referentes ao par – Altura Manométrica x Rotação (equação 1), e ao par Vazão volumétrica X Rotação (equação 2), gerou dados (apêndices B e C) necessários para a elaboração de novas curvas de performance Altura manométrica X Vazão volumétrica para as novas rotações, apresentado na Figura 03.



Figura 03: Curvas de Performance Estimadas p/ diferentes rotações da B-300016A/B

Aplicando-se a metodologia citada e as condições definidas na descrição do sistema de bombeio selecionado, chegou-se aos resultados contidos na tabelas 05. A potência de eixo obtida para a bomba pode ser comparada com a potência estimada pelo fabricante através das curvas fornecidas e que são apresentadas no anexo D. A vazão mássica de consumo de vapor de média pressão para a condição atual foi obtida a partir do gráfico fornecido pelo fabricante de consumo de Vapor x Potência de eixo contido no anexo E. A partir da nova rotação da turbina e a potência de eixo necessária, foi solicitado ao fabricante testes em uma turbina de mesmo modelo para estimativa de consumo de vapor para a condição de 2692rpm e $P_{e_{turb}}=78kW$. A partir do gráfico enviado pelo fabricante contido no anexo F, foi possível estimar a nova vazão mássica de consumo de vapor de média pressão.

Para confirmação da quantidade de vapor de média pressão economizada pelo novo sistema de bombeio com rotação variável, foi feito um teste de campo, contido na tabela 06, e assim verificar a qualidade da estimativa obtida a partir da equação 07. Desse modo foi aplicado na turbina ensaiada uma equação obtida através de ensaios experimentais realizados em uma turbina diferente em porte e em número de extrações de vapor. Porém, apesar das diferenças entre as turbinas ensaiada e a turbina onde Schegliaiev obteve a equação 7, o teste pode ser realizado e os resultados obtidos apresentam boa aproximação, (Schegliaiev, 1978).

Tabela 05: Resultados da Alteração do Sistema de Bombeio p/ vazão de processo de 625 m³/h

	DESCRIÇÃO	c/ Válvula Estrangulamento	c/ Rotação Variável
n_{bomb}	Rotação da bomba (rpm)	1800	1100
W	Salto entálpico (J/kg)	1090	402
H	Altura manométrica (m)	110	41
η	Eficiência da bomba (%)	54	72
P	Potência transferida ao fluido (kW)	148	55
Pe	Potência eixo da bomba (kW)	275	77
Pe_{turb}	Potência eixo da turbina (kW)	280	78
n_{turb}	Rotação da turbina (rpm)	4405	2692
\dot{m}	Vazão mássica de vapor média pressão consumido (kg/h)	10500	5900

Tabela 06: Teste de campo da TB-300016A

TESTE DE CAMPO DA TB-300016A										
Rotação Turbina (rpm)	Rotação Bomba (rpm)	Dados Bomba			Dados Turbina					Válvula
		Pressão Sucção Bomba (kPa)	Pressão Descarga Bomba (kPa)	Vazão Processo m ³ /d	Pressão Vapor Adm (kPa)	Pressão Vapor Adm Após Regulador (kPa)	Temperatura Vapor Adm (K)	Pressão Vapor Exaus (kPa)	Temperatura Vapor Exausto (°C)	Abertura da válvula estrangulamento
4405	1800	380	1250	15000	1320	1070	509	360	455	24%
3915	1600	380	1080	14670	1330	890	509	360	463	27%
3670	1500	380	990	14654	1340	830	509	360	467	32%
3180	1300	380	840	14955	1350	720	509	360	473	38%
2940	1201	380	780	14970	1350	700	509	360	474	46%
2700	1103	380	720	15040	1360	650	509	360	476	68%

Aplicando-se os resultados do teste de campo da para a rotação de 2700rpm na equação 07, tais como pressão do vapor na entrada da turbina após o regulador de 650 kPa, pressão do vapor no exausto da turbina de 360 kPa e temperatura do vapor na entrada da turbina de 509 K, ou 236°C, foi obtido o resultado de que o consumo de vapor nestas condições é 61% do consumo nominal de vapor (12500kg/h) para a condição de projeto considerada (4405rpm e 350kW). Dessa forma o consumo de vapor para a condição considerada é de 7625kg/h.

Na **tabela 07** são mostrados os valores de consumo de vapor para a situação considerada pelo método atual com válvula de estrangulamento e as estimativas pelo método de rotação variável feito pelo fabricante e pelo teste de campo e aplicação da equação de Schegliaiev.

Tabela 07: Consumos de Vapor Estimados

Consumo Vapor com Válvula Estrangulamento	10500 kg/h
Consumo Vapor Rotação Variável (estimado pelo fabricante)	5900 kg/h
Consumo Vapor Rotação Variável (estimado por teste e aplicação Schegliaiev)	7625 kg/h

A diferença encontrada entre o consumo de vapor estimado pelo fabricante e pelo teste de campo pode ser atribuída ao fato de que o fabricante fez o teste em uma turbina de mesmo modelo da TB-300016, já no teste de campo realizado na própria turbina estudada foi aplicado o método e equação de Schegliaiev, o qual é destinado para turbinas de grande porte e com número de extrações elevadas.

6. EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

6.1. POLUENTES

Segundo Pires (2005), poluente atmosférico é toda substância sólida, líquida ou gasosa que afeta prejudicialmente o meio ambiente após mudanças químicas na atmosfera ou pela

ação sinérgica com outras substâncias. existem ainda outras classificações dos poluentes, de acordo com sua composição química (orgânicos ou inorgânicos), ou de acordo com seus efeitos (substâncias radioativas, metais pesados, tóxicas, carcinogênicos, mutagênicos, etc).

6.1.1 SO_2

O dióxido de enxofre é introduzido na atmosfera por atividades humanas e naturais, sendo que as atividades humanas respondem por 75% do SO_2 lançado na atmosfera. Este poluente possui um tempo de vida entre 2 a 6 dias na atmosfera, podendo atingir cerca de 4.000km de distância de sua fonte de emissão, além de seu processo de dispersão ser bastante complexo podendo mover-se por centenas de quilômetros antes de se dispersar (Carvalho Jr. 2003). Após ser lançado na atmosfera parte do SO_2 sofrerá oxidação por meio de uma variedade de mecanismos sendo o meio mais comum a oxidação a partir do radical hidroxilo (HO).

Outra parte do SO_2 lançado para atmosfera se oxida a SO_3 e este, pela reação com vapor d'água é convertido em H_2SO_4 . Esse ácido juntamente com outros ácidos formados a partir de óxidos de nitrogênio compõe um sério risco ao meio ambiente e a saúde das pessoas. Pois eles constituem a deposição ácida úmida e seca que afetam todo o ecossistema. A deposição ácida úmida também é chamada de “chuva ácida”.

6.1.2 NO_x

NO_x é o termo geral que designa a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2), os dois componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão. O NO lançado na atmosfera rapidamente se transforma em NO_2 e as taxas de emissão mássica são sempre calculadas considerando seus dois compostos como exclusivamente NO_2 (Carvalho Jr. 2003).

Esse poluente assim como o SO_2 também provoca a “chuva ácida”, além de ser o principal causador das reações fotoquímicas que levam à formação do smog³ fotoquímico.

A formação de NO_x é atribuída a duas fontes distintas:

- NO_x atmosférico: formado a partir da oxidação do N_2 do ar atmosférico;
- NO_x do combustível: formado a partir da quebra das ligações e oxidação do nitrogênio presente no combustível;

6.2. GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

Alguns gases presentes na atmosfera permitem a penetração da radiação solar na superfície da Terra, mas bloqueiam a passagem da radiação infravermelha re-emitada pelas superfícies do planeta, contribuindo para o aquecimento ambiental, e produzindo o que é conhecido por “efeito estufa”. Nas últimas décadas, a concentração de gases com capacidade de absorver e refletir a radiação infravermelha aumentaram muito na atmosfera, além disso os índices de aquecimento global se tornaram alarmantes. No entanto, já se sabe que o CO_2 é responsável por cerca de metade da radiação infravermelha retida na atmosfera (Manahan, 1993 apud Carvalho JR, 2003).

³ Smog: névoa marrom-amarelada que aparece primariamente sobre áreas urbanas em dias ensolarados. (Carvalho Jr, 2003).

6.3. LEVANTAMENTO DAS EMISSÕES ATUAIS DA REFINARIA

6.3.1 EMISSÕES TOTAIS DA REFINARIA

As refinarias de petróleo podem ser avaliadas através de metodologias que permitam uma comparação de unidades industriais de diferentes tamanhos e diferentes complexidades. O indicador mais utilizado para comparar a capacidade de processamento das refinarias é a sua capacidade de destilação equivalente (EDC – *equivalent distillation capacity*). Esse indicador atribui fatores de complexidade para cada unidade de processo. Onde para a complexidade das instalações da Refap, $1\text{m}^3/\text{dia} = 44,35 \text{ EDC}$, ou seja, $30.000\text{m}^3/\text{dia} = 1.330.618 \text{ EDC}$. A Refap aumentou sua capacidade de processamento de $20.000\text{m}^3/\text{dia}$ para $30.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ nos últimos anos, porém mais relevante foi o aumento do EDC que foi praticamente triplicado nos últimos anos, muito influenciado pelo aumento da complexidade e redução do °API.

Inúmeras ações já foram feitas para reduzir as emissões da refinaria, pelo rigoroso controle dos processos de produção e tratamento dos produtos, com a posterior recuperação de enxofre diminuindo a emissão na atmosfera pelas chaminés de fornos, incineradores e caldeiras. Houve incremento do enxofre sólido produzido nos últimos anos, bem maior inclusive do que o percentual do aumento de carga processada. O aumento de carga processada juntamente com a complexidade das plantas ocasionou um aumento do consumo bruto de combustível da refinaria. O conjunto de obras incluiu um aumento da eficiência energética que proporcionou uma redução das emissões relativas de CO_2 , medidas em kg/barril de petróleo equivalente processado (kg/bbl EDCU).

As emissões relativas de NO_x da refinaria tiveram grande redução, através das mudanças na matriz energética e novos equipamentos, porém as emissões totais se mantiveram praticamente inalteradas. As emissões relativas de SO_2 tiveram grande redução apesar do aumento de capacidade de destilação utilizada (EDCU). As emissões absolutas de enxofre da Refap estão menores do que os valores de emissões anteriores à ampliação da refinaria, fruto da consolidação de todas as unidades operacionais da Refap ampliada. Como decorrência dos resultados que estão sendo obtidos, a refinaria reduziu sua meta de emissões máximas mensais de SO_2 para 333t/mês a partir de setembro/2009.

Uma medida que fez parte do licenciamento ambiental da ampliação da Refap foi a instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar nas cidades de Esteio e Canoas. Ao longo dos anos estas estações estão demonstrando que a qualidade do ar no entorno da refinaria está melhorando. Reduzindo assim os efeitos nocivos destes poluentes em animais, vegetais e na saúde das pessoas que moram nas proximidades.

6.3.2. EMISSÕES NOS GERADORES DE VAPOR

O presente trabalho visa obter uma redução das emissões atmosféricas através da menor necessidade de geração de vapor nas caldeiras, e por isso as emissões mais relevantes neste contexto são aquelas emitidas nestes equipamentos, sendo que as emissões de fornos e incineradores não serão afetadas pela melhoria que este trabalho almeja alcançar.

Na [tabela 08](#) constam os dados de operação das caldeiras de geração de vapor da refinaria em condições normais de operação.

Na Refap existem instalados sistemas de monitoramento de emissões nas chaminés das fontes de emissão. A instalação dos CEMS⁴ permite o monitoramento e atuação no sentido da redução das emissões atmosféricas, através do controle de excesso de ar, por exemplo.

Dessa forma, as emissões totais da refinaria foram resumidas na [tabela 09](#).

⁴ CEMS: Continuous Emissions Monitoring System

Tabela 08: Dados das Caldeiras de Geração de Vapor em Condições Normais

Condições NORMAIS	Capacidade	Combustíveis		Teor de O ₂	Gases Exaustos	Carga SO ₂ calculada ³				Carga NO _x calculada ⁴			
		Óleo	Gás ₁			t/mês	g/s	% vol	mg/Nm ³	t/mês	g/s	% vol	mg/Nm ³
	Gcal/h	kg/h	Nm ³ /h	%	Nm ³ /h	t/mês	g/s	% vol	mg/Nm ³	t/mês	g/s	% vol	mg/Nm ³
D-801 A	26,00	938	2025	3	36089	13,93	5,37	0,0188%	536	6,96	2,69	0,0131%	268
D-801 B	26,00	938	2025	3	36089	13,93	5,37	0,0188%	536	6,96	2,69	0,0131%	268
D-801 C	26,00	938	2025	3	36089	13,93	5,37	0,0188%	536	6,96	2,69	0,0131%	268

Tabela 09: Emissões totais da refinaria em toneladas/mês.

	t SO ₂ /mês	t NO _x /mês	t CO ₂ /mês
Emissões Totais (Caldeiras + Fornos + Regeneradores)	300	210	135.000

6.4. ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES

6.4.1. Redução do Consumo de Vapor Considerado

Para avaliação da redução das emissões que pode ser obtida através da implantação do bombeamento com rotação variável, devido a diferença encontrada entre as metodologias aplicadas, foi necessário definir um valor intermediário de consumo de vapor entre os valores obtidos pelos testes citados na [tabela 07](#). Assim, foi considerado um consumo de vapor de média pressão utilizado na TB-300016 de 6500kg/h, e por consequência de redução de consumo de 4000kg/h para realizar o mesmo trabalho de bombeio pelo sistema sem a válvula de estrangulamento. Para obtenção do vapor de alta pressão economizado nos geradores de vapor foi feita a avaliação das entalpias dos vapores e eficiência das turbinas envolvidas neste processo de conversão de vapor de alta em média pressão.

O vapor de média pressão superaquecido (1,4 MPa @ 240°C) possui a seguinte entalpia:

$$h_M = 2903,6 \text{ kJ/kg}$$

Já o vapor de alta pressão superaquecido (6 MPa @ 430°C) possui a seguinte entalpia:

$$h_A = 3254,9 \text{ kJ/kg}$$

A eficiência das turbinas de alta pressão da refinaria é de 96% e foi obtida a partir da equação 08. Assim, a redução do consumo de 4000 kg/h de vapor de média pressão é equivalente a economia de 3717 kg/h de vapor de alta pressão superaquecido gerado nas caldeiras da refinaria. Conforme citado na [tabela 10](#).

Tabela 10: Parâmetros da redução do consumo de vapor

Consumo Vapor Média Pressão Considerado	6500 kg/h
Redução do Consumo de Vapor de Média Pressão Obtido	4000 kg/h
Equivalência na Redução do Consumo de Vapor de Alta Pressão Obtido	3717 kg/h

6.4.2. Fator de emissão de SO₂

Segundo Carvalho Jr (2003), a concentração de SO₂ nos gases de combustão pode ser calculada a partir da [tabela 11](#) onde constam os fatores de emissão de SO₂ em kg/m³ de combustível, onde S é o percentual de enxofre no combustível.

Tabela 11: Fatores de emissão de enxofre

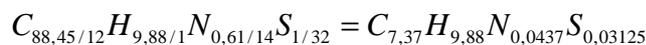
Combustível	Fator de Emissão
Óleo combustível	18,84 x S kg/m ³
Gás natural	zero

Considerando o teor de enxofre no óleo combustível igual a 1% (limite estabelecido pela FEPAM), e que os geradores de vapor queimam 35% de óleo e 65% de gás em condições normais, temos que $18,84 \times 1 = 18,84 \text{ kg SO}_2/\text{m}^3$ óleo.

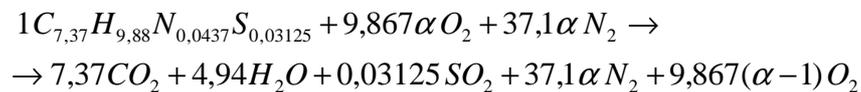
Para condições normais os geradores de vapor da Refap consomem 938 kg/h de óleo, cuja densidade é $950 \text{ kg}/\text{m}^3$, assim a refinaria emite 13,4 T SO_2 /mês em cada caldeira geradora de vapor para 40T/h de produção. Então a emissão de SO_2 nestes equipamentos é de:

- 0,465 kg SO_2 por hora a cada 1000kg Vapor Alta Pressão gerado, ou
- 335 kg SO_2 por mês a cada 1000kg Vapor Alta Pressão gerado.

Outra maneira de se estimar a emissão de SO_2 , segundo Carvalho Jr (2003) é calcular a partir da reação de combustão do óleo combustível típico contendo 1% de enxofre (conforme limite da legislação ambiental), 88,45% carbono, 9,88% hidrogênio, 0,61% de nitrogênio e 0,06% de cinzas, para 100g de combustível.



Assim a reação de combustão do óleo combustível com excesso de ar genérico α fica:



Assim $0,03125 \cdot 64 \cdot 10 = 20 \text{ gSO}_2/\text{kg}$ óleo combustível ou então, podemos considerar que temos $20 \text{ kgSO}_2/\text{T}$ de óleo combustível.

Como para as condições normais de operação são consumidos 938 kg/h de óleo combustível, temos $18,76 \text{ kgSO}_2/\text{h}$ ou $13,5 \text{ T SO}_2/\text{mês}$ para 40 T de vapor de alta pressão produzido. Então a emissão de SO_2 nos geradores de vapor calculada pela reação de combustão é de:

- 0,469kg SO_2 por hora a cada 1000kg de Vapor Alta Pressão gerado, ou
- 337kg SO_2 por mês a cada 1000kg Vapor Alta Pressão gerado.

6.4.3. Fator de emissão de NO_x

Segundo Carvalho Jr. (2003) a concentração de NO_x nos gases de combustão a partir da queima de gás natural em caldeiras frontais de grande porte é de $463 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para um excesso de ar de 15% ou excesso de O_2 de 3%.

Já a concentração de NO_x nos gases de combustão para a queima de óleo combustível nas mesmas condições é de $692 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

As caldeiras da Refap operam com excesso de O_2 em 3% e queimam em condições normais 35% de óleo combustível (1% de enxofre) e 65% de gás natural ou de refinaria. Então a concentração estimada de NO_x nos gases de combustão das caldeiras é de $612 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

Como a vazão de gases de combustão para condições normais é de $36089 \text{ Nm}^3/\text{h}$ temos $22,09 \text{ kg NO}_x/\text{h}$ para 40 T de vapor de alta pressão produzido. Ou $15,9 \text{ T NO}_x/\text{mês}$ para 40T de vapor de alta pressão produzido. Então a emissão de NO_x nas caldeiras é de:

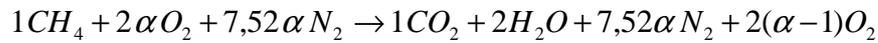
- 0,552kg NO_x por hora a cada 1000kg de Vapor de Alta Pressão gerado, ou
- 397,6kg NO_x por mês a cada 1000kg de Vapor de Alta Pressão gerado.

A diferença encontrada nos valores obtidos a partir de Carvalho Jr.(2003) e pelos dados da refinaria para emissões de NO_x podem ser atribuídas ao fato de que foram consideradas as condições das caldeiras operando nas condições normais, para 40T/h de vapor de alta pressão produzido. Para as condições nominais, ou seja, condições máximas de produção de vapor, os valores de emissões de NO_x são mais próximos aos informados por Carvalho Jr. (2003).

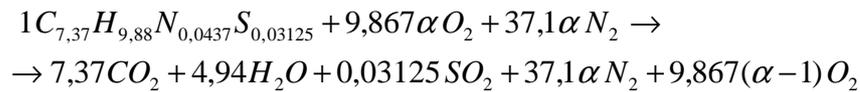
6.4.4. Fator de emissão de CO₂

Segundo Carvalho Jr. (2003), para estimarmos a concentração de CO₂ devemos considerar a reação de combustão dos combustíveis, neste caso gás natural e óleo combustível.

Para o gás natural temos a seguinte reação de combustão:



Já para o óleo combustível, temos para 100g de óleo:



Então temos a emissão de 44g CO₂ para cada 16g de gás consumido, ou 1965g CO₂ para cada Nm³ de gás natural ou gás de refinaria consumido. E ainda 324g CO₂ para cada 100g de óleo combustível queimado. Como as caldeiras em condições normais consomem 938kg/h de óleo e 2025 Nm³/h de gás, a emissão de CO₂ é de:

- 176 kg CO₂ por hora a cada 1000kg de Vapor Alta Pressão gerado.
- 126 Toneladas de CO₂ por mês a cada 1000kg Vapor Alta Pressão gerado.

Então as emissões dos geradores de vapor da Refap foram resumidas na [tabela 12](#).

Tabela 12: Emissões nas caldeiras geradoras de vapor da refinaria

	t SO ₂ /mês	t NO _x /mês	t CO ₂ /mês
Refap/Fepam	42	21	19.440
Medido CEMS (100dias)	48,3	21	*
Estimado Reação Combustão (Teórico)	40,2	47,7	15.120

E, dessa forma, para o consumo de vapor de alta pressão evitado de 3717 kg/h através da implantação do sistema de bombeamento com rotação variável em uma bomba da refinaria, podem ser obtidas as reduções de emissões atmosféricas mostradas na [tabela 13](#).

Tabela 13: Redução de Emissões Atmosféricas obtidas

Poluente ou GEE	Redução das Emissões		
	absolutas	Redução Relativa nas Emissões das Caldeiras Geradoras de Vapor	Redução Relativa nas Emissões Totais da Refinaria
SO ₂	1,25 t/mês	3%	0,4%
NO _x	1,48 t/mês	3%	0,7%
CO ₂	468 t/mês	3%	0,35%

7. VIABILIDADE ECONÔMICA

Para permitir a estabilidade de operação da turbina em uma rotação menor seria necessário substituir o atuador da regulação de vapor da mesma, do modelo eletro-hidráulico existente, para um modelo eletro-pneumático. Os preços para substituir o atuador de regulação eletro-hidráulico TG-17E existente para o atuador regulador de vapor eletro-pneumático Valtek fornecido pelo fabricante, são mostrados na [tabela 14](#).

Tabela 14: Preço de componentes e serviços para substituição do atuador regulador de vapor

Quant	Descrição	Preço
1	Tampa para o corpo de válvulas	R\$ 1.760,00
1	Kit de fixação	R\$ 4.364,00
1	Atuador eletro-pneumático Valtek (regulação de vapor)	R\$ 24.880,00
X	Fiação, eletrodutos e acessórios	R\$ 15.000,00
20HH	Mão de obra de projeto	R\$ 2.000,00
100HH	Mão de obra de montagem e testes	R\$ 7.000,00
30HH	Mão de obra de engenharia (reconfiguração)	R\$ 15.000,00
-	TOTAL	R\$ 55.004,00

As condições de pagamento são 100% à 30 dias do faturamento. E os combustíveis utilizados nos geradores de vapor têm custos conforme citados na [tabela 15](#).

Tabela 15: Custo dos combustíveis para Janeiro 2010:

	R\$/Tonelada
CUSTO GÁS NATURAL	1.121
CUSTO GÁS COMBUSTÍVEL	470
CUSTO ÓLEO COMBUSTÍVEL	640

Todavia a economia de combustível é oriunda da redução de vapor gerado, e por isso devemos utilizar o custo marginal da produção de vapor conforme citado na [tabela 13](#):

Tabela 13: Custo Marginal dos Vapores

	R\$/tonelada
Vapor Alta Pressão	26,00
Vapor Média Pressão	18,10
Vapor Baixa Pressão	13,00

De acordo com a tabela de custos marginais dos vapores, a redução do consumo de 3717 kg/h de vapor de alta pressão proporcionará uma economia de R\$ 96,60 por hora. Assim o ganho mensal é de R\$ 69.583,00. E o retorno do investimento ocorre em aproximadamente 1 mês de operação.

8. CONCLUSÕES

A alteração do modo de controle de vazão de rotação constante com válvula de estrangulamento na descarga, para rotação variável, aplicado a bomba de hidrocarboneto médio da REFAP, apresentou resultados positivos na redução de emissões atmosféricas da refinaria. Tendo sido obtido uma redução relativa nas emissões de SO₂, NO_x e CO₂ nos geradores de vapor na ordem de 3%. Esses resultados representaram uma redução global nas emissões da refinaria na ordem de 0,4% SO₂, 0,7% NO_x e 0,35% de CO₂. O resultado global foi menor porque a maior parte das emissões da refinaria não são originários da queima de combustíveis nos geradores de vapor, mas sim dos fornos, incineradores e regeneradores existentes no processo. A alteração do modo de controle de vazão proposta, apresentou-se viável economicamente. Sendo cabível um estudo futuro para aplicação da mesma metodologia a outras bombas de processo da refinaria podendo vir a proporcionar maiores reduções de emissões atmosféricas na REFAP.

REFERÊNCIAS

J.S.S.OLIM et al.; **Conservação de Energia em Refinarias de Petróleo**, 2º Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, 2003.

CHAN, W.N.; **Quantificação e Redução de Gases de Efeito Estufa em Refinarias de Petróleo**, Dissertação de Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos, UNICAMP, SP, 2006.

RODRIGUES, G.R.; FILHO, J.R.F.; **Utilização de Indicador de Emissões Atmosféricas como Ferramenta de Gestão em Refinarias de Petróleo**, IV Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2008.

CARVALHO Jr, J.A.; LAVACA, P.T.; **Emissões em Processos de Combustão**, Ed. UNESP, São Paulo, 2003.

PIRES, D.O.; **Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**, Tese, UFRJ, 2005.

UGAYA, C.M.L.; HENSCHER, J.; **Metodologia para Identificação de Aspectos Ambientais Significativos no Processo de Refino de Petróleo**, XXIV Encontro Nacional de Eng. Produção, 2004.

HENN, E.A.L.; **Máquinas de Fluxo**, Ed UFSM, 2ªEd, Santa Maria 2006.

BRAN, R.; **Máquinas de Fluxo: Turbinas, Bombas e Ventiladores**, Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 1969.

FOX, R.W; McDONALD, A.T; **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, Ed LTC, Rio de Janeiro, 2001.

GODOY, J.; **Turbinas a Vapor**, Setor de Ensino da Guanabara, Rio de Janeiro, 1989.

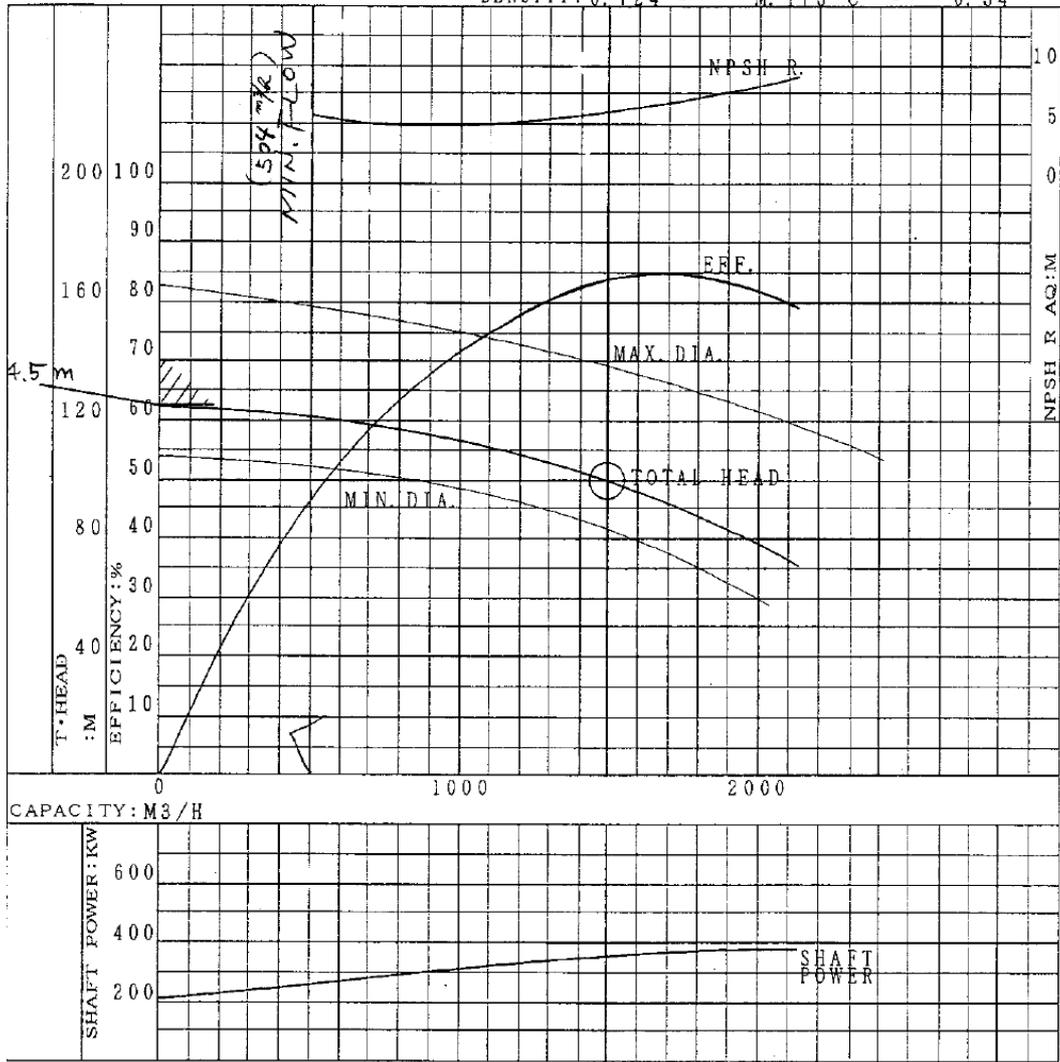
SCHEGLIAIEV, A.V., **Turbinas de Vapor**, Editora Mir, Moscou, 1978.

ANEXOS

Anexo A
CURVA DE PERFORMANCE DA BOMBA

 PETROBRAS <small>PETROBRAS S.A.</small>	DATA SHEET	No. PB FD-0300-31-ZZZ-1667
	RESIDE FLUID CATALYTIC CRACKING UNIT - U-300 FRACTIONATION AND VAPOUR RECOVERY SECTION	
	SHEET 2 of 2	PB REQ. NO.
EXPECTED PERFORMANCE CURVE (B-300016A/B) RM-0300-31-70C-0001		

MODEL 400X300KST56 FREQUENCY 60 Hz OUTPUT 385 KW
 MOTOR
 RATING POLES — P SPEED — min⁻¹ OUTPUT —
 LIQUID: kg/c N. 142° C CP
 DENSITY: 0.724 TEMP.: M. 175° C VIS.: 0.34



SER. NO.		MODEL	CAPACITY	TOTAL HEAD	SPEED	OUTPUT	Q'TY
R010247605		400X300KST56	M3/H 1496	M 99.5	min ⁻¹ 1800	KW 385	2

ITEM NO. B-300016A/B,
 FRACTIONATOR UPPER R
 SERVICE REFLUX PUMP



EBARA CORPORATION
 JUN-14-2001
 J 502 K. HAMAJIMA

DOC. NO. BBA-300016-102
 A4-210E

Anexo B
ALTURA MANOMÉTRICA PARA NOVAS ROTAÇÕES E ISORENDIMENTOS

	EFICIÊNCIA	84,0	80	70	60	50	45	40	35	30
ROTAÇÃO (rpm)	ALT. MAN (m)									
1800		99,5	101,5	110,0	114,0	116,0	118,0	120,0	121,0	122,0
1700		88,8	90,5	98,1	101,7	103,5	105,3	107,0	107,9	108,8
1600		78,6	80,2	86,9	90,1	91,7	93,2	94,8	95,6	96,4
1500		69,1	70,5	76,4	79,2	80,6	81,9	83,3	84,0	84,7
1400		60,2	61,4	66,5	69,0	70,2	71,4	72,6	73,2	73,8
1300		51,9	52,9	57,4	59,5	60,5	61,5	62,6	63,1	63,6
1200		44,2	45,1	48,9	50,7	51,6	52,4	53,3	53,8	54,2
1100		37,2	37,9	41,1	42,6	43,3	44,1	44,8	45,2	45,6
1000		30,7	31,3	34,0	35,2	35,8	36,4	37,0	37,3	37,7
900		24,9	25,4	27,5	28,5	29,0	29,5	30,0	30,3	30,5
800		19,7	20,0	21,7	22,5	22,9	23,3	23,7	23,9	24,1
700		15,0	15,4	16,6	17,2	17,5	17,8	18,1	18,3	18,5
600		11,1	11,3	12,2	12,7	12,9	13,1	13,3	13,4	13,6
500		7,7	7,8	8,5	8,8	9,0	9,1	9,3	9,3	9,4
400		4,9	5,0	5,4	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,0

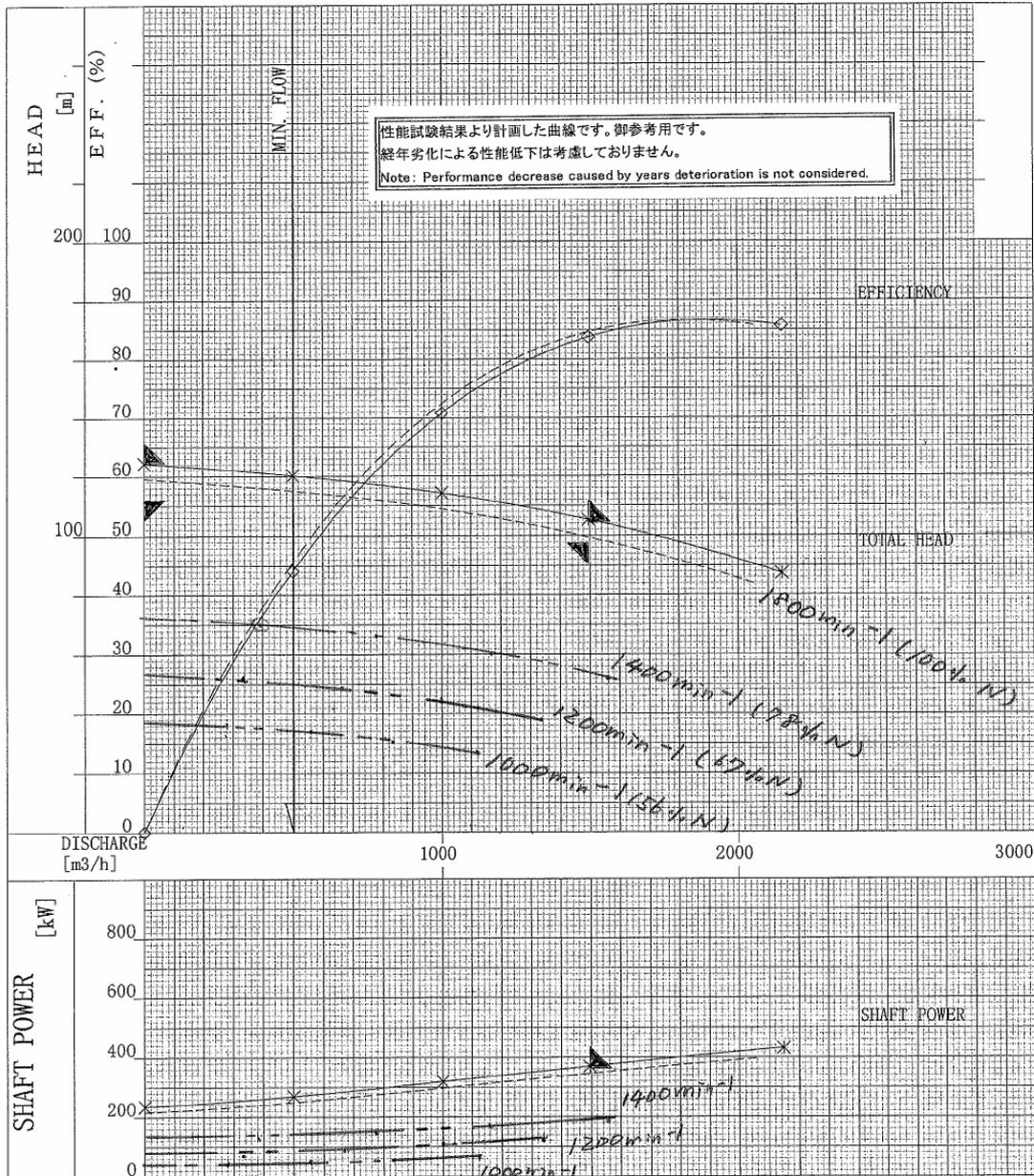
Anexo C
VAZÃO PARA NOVAS ROTAÇÕES E ISORENDIMENTOS

	EFICIÊNCIA	84,0	80	70	60	50	45	40	35	30
ROTAÇÃO (rpm)	VAZÃO (m³/h)									
1800		1496,0	1280,0	950,0	730,0	550,0	480,0	420,0	350,0	300,0
1700		1412,9	1208,9	897,2	689,4	519,4	453,3	396,7	330,6	283,3
1600		1329,8	1137,8	844,4	648,9	488,9	426,7	373,3	311,1	266,7
1500		1246,7	1066,7	791,7	608,3	458,3	400,0	350,0	291,7	250,0
1400		1163,6	995,6	738,9	567,8	427,8	373,3	326,7	272,2	233,3
1300		1080,4	924,4	686,1	527,2	397,2	346,7	303,3	252,8	216,7
1200		997,3	853,3	633,3	486,7	366,7	320,0	280,0	233,3	200,0
1100		914,2	782,2	580,6	446,1	336,1	293,3	256,7	213,9	183,3
1000		831,1	711,1	527,8	405,6	305,6	266,7	233,3	194,4	166,7
900		748,0	640,0	475,0	365,0	275,0	240,0	210,0	175,0	150,0
800		664,9	568,9	422,2	324,4	244,4	213,3	186,7	155,6	133,3
700		581,8	497,8	369,4	283,9	213,9	186,7	163,3	136,1	116,7
600		498,7	426,7	316,7	243,3	183,3	160,0	140,0	116,7	100,0
500		415,6	355,6	263,9	202,8	152,8	133,3	116,7	97,2	83,3
400		332,4	284,4	211,1	162,2	122,2	106,7	93,3	77,8	66,7

Anexo D

Curvas de Performance da Bomba para diferentes Rotações

PERFORMANCE TEST RECORD		DATE : MAY-28-02
FRACTIONATOR UPPER REFLUX PUMP		WITNESSED / REVIEWED TEC
ITEM No. : B-300016A		BY <i>[Signature]</i>
EBARA SER. No. : R 010247605	1 / 2	MODEL : 400X300KST
<small>($\rho = 724.0 \text{ kg/m}^3$)</small>		
SPECIFIED ITEMS :	1496 m ³ /h × 99.5 m × 1800 min ⁻¹	× 385.00 kW
————— IMP. DIA AT TEST (477.0mm)		
- - - - - FINAL IMP. DIA (467.0mm)		



FOR REFERENCE ONLY APPROVED BY : Y. MOGI CHECKED BY : Y. CHAKI TESTED BY : K. KANAZAWA



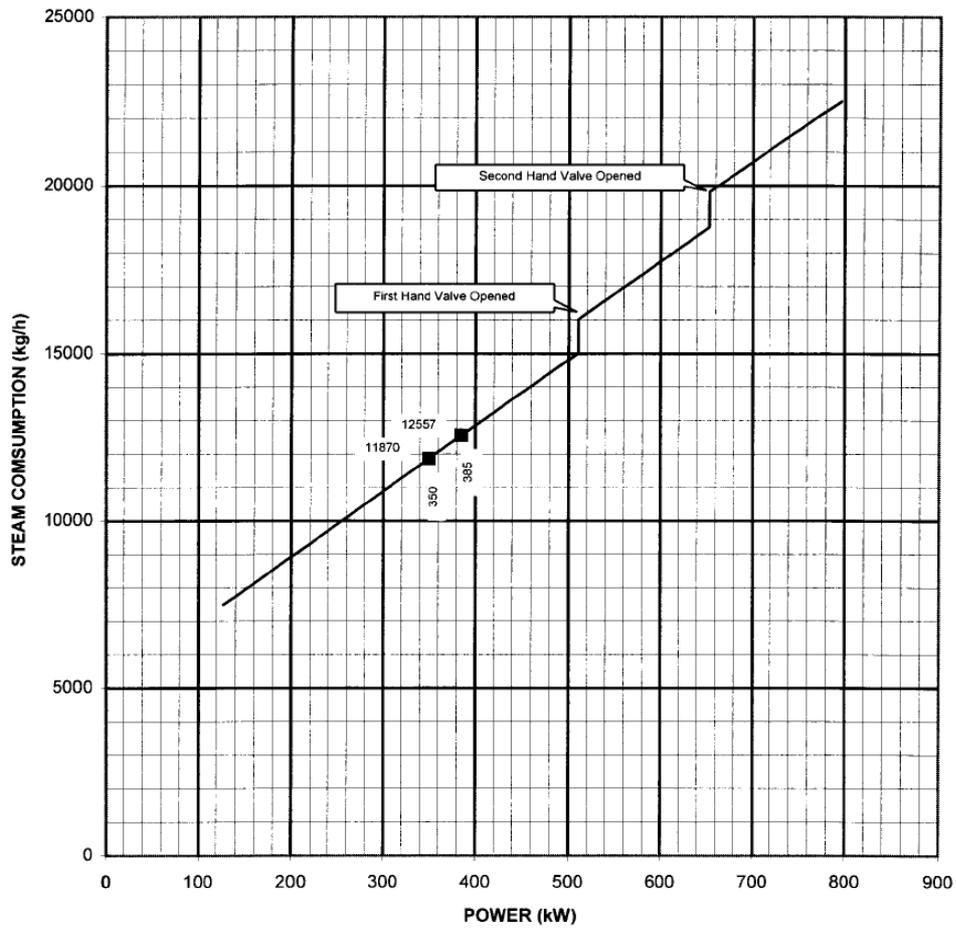
A. Wada May. 13. '10



Anexo E
 CONSUMO VAPOR X POTÊNCIA EIXO PARA A TB300016A/B
 NAS CONDIÇÕES NOMINAIS E 4405RPM

	DATA SHEET	N ^o : FD-0300-33-ZZZ-3965
	UNIT: RESID FLUID CATALYTIC CRACKING UNIT (U-300) FRACTIONATION AND VAPOUR RECOVERY SECTION	SHEET: 2 of 4
	TITLE: PERFORMANCE CURVE	PB REQ. N ^o : RM-0300-33-TOC-0002

**PERFORMANCE CURVE
 "RATED" CONDITION**



"RATED" CONDITION	
NORMAL INLET PRESURE, kgf/cm ² g	13,6
NORMAL INLET TEMPERATURE, °C	240
NORMAL EXHAUST PRESSURE, kgf/cm ² g	3,5
ROTATION, rpm	4405

Anexo F
CONSUMO VAPOR X POTÊNCIA EIXO PARA A TB300016A/B A 2692 RPM

CONDICÃO NORMAL (70KW A 2692RPM)

