



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

WTOSON MAIKO OLIVEIRA

**APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA NO CONTROLE DE VAZÃO DOS
GERADORES DE VAPOR**

MOSSORÓ-RN
2014

WTOSON MAIKO OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA NO CONTROLE DE VAZÃO DOS
GERADORES DE VAPOR

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. André Duarte Lucena.

MOSSORÓ-RN
2014

O Conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

O48a Oliveira, Wtoson Maiko.

Aplicações de inversor de frequência no controle de vazão dos geradores de vapor. Wtoson Maiko Oliveira -- Mossoró, 2014.

69f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Duarte Lucena.

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de
Graduação.

1. Vapor - Controle de vazão. 2. Eficiência. 3. Gerador de
vapor. 4. Inversor de frequência. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /114-14

CDD: 621.1

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba
CRB-15/452



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 19 horas e 20 minutos do dia 27 de fevereiro do ano de dois mil e catorze, no laboratório de Arranjos Produtivos, do prédio de Engenharia II no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, reuniu-se a banca examinadora de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) de autoria do aluno **WTOSON MAIKO OLIVEIRA**, aluno do curso de Bacharelado em Ciências e Tecnologia, desta instituição com o título, "**APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUENCIA NO CONTROLE DE VAZÃO DE GERADORES DE VAPOR**". A Banca Examinadora ficou assim constituída: Prof. MSc. André Duarte Lucena, presidente da banca e orientador do TCC; Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto e o Prof. MSc. Alexandre José de Oliveira, como membros. Foram registradas as seguintes ocorrências: após a apresentação do aluno pelo Presidente da banca, ocorreu a apresentação do TCC, seguido de questionamentos pelos membros da banca; finalizando, foram sugeridas algumas modificações e correções. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada, tendo o aluno obtido às seguintes notas: 9,5; 9,5 e 9,5. Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi aprovado com média geral 9,5, fazendo jus, portanto, ao título de Bacharel em Ciência e Tecnologia. E para constar, eu, André Duarte Lucena, lavrei a presente ata que, após lida e aprovado pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 27 de fevereiro de 2014.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.

Prof. MSc. André Duarte Lucena – Presidente

Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto - Membro

Prof. MSc. Alexandre José de Oliveira - Membro

À Deus, o único digno de toda honra e glória para todo sempre, ao meus familiares em geral, aos meus pais, aos amigos e, em especial, à minha mãe Maria de Fátima e ao meu pai Antônio Carlos, que juntos fizeram a diferença em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, razão da minha existência, o começo e o fim, o refúgio nas horas de tristeza, pois pela sua graça e misericórdia permite que eu viva esses momentos.

À minha querida mãe, Maria de Fátima Oliveira, pessoa na qual eu amo tanto, razão maior que me faz seguir em frente em todos os momentos da vida, que sempre viveu em função do meu sucesso, enfrentando tantas dificuldades e sempre buscando o melhor para minha vida, não existem palavras para medir ou expressar meu sentimento por essa mulher. Muito Obrigado!

Ao meu pai, Antônio Carlos Santiago Oliveira, que a vida inteira esteve na labuta, tanto sacrifício para que eu pudesse estar aqui, tantas vezes esteve ausente da família para poder suprir nossas necessidades diárias. Sou muito grato por tudo.

À minha namorada, Fredyana Karla, que conseguiu suportar a minha ausência durante todo esse tempo, que soube entender a necessidade de compartilhar o pouco tempo que tínhamos juntos com as tarefas acadêmicas.

Ao professor André Lucena, por ter aceitado me orientar, mesmo em um momento difícil e de transição da sua carreira, quando assumiu a coordenação do curso e tantos problemas houveram, mas sempre se manteve paciência. Agradeço pelos conselhos, pelas ideias, pelos elogios, pela cobrança e por não desistir e continuar a me orientar.

A todos professores que ao longo do curso contribuíram para a minha formação, em especial aos membros da banca Me. Alexandre Jose de Oliveira e Dr. André Pedro por se disporem a contribuir com esse trabalho.

Aos meus fiéis e companheiros amigos que estiveram ao meu lado durante esse período, especialmente Kelvin, pois sempre estivemos juntos não apenas na vida acadêmica mas também compartilhando as dificuldades e alegrias no dia a dia, em decisões tomadas para a vida inteira, ao companheiro Ciro Maia, que aprendi a admirar por sua simplicidade de enxergar a vida, hoje somos um trio caminhando todos na mesma direção, aos colegas Felipe, João Marcos e Roney que foram muito importante ao longo do curso, aprendi muito com cada de vocês.

“Melhor é serem dois do que um, porque têm melhor paga do seu trabalho. Porque se um cair, o outro levanta o seu companheiro; mas aí do que estiver só; pois, caindo, não haverá outro que o levante”.

Eclesiastes 4:9-10

RESUMO

O petróleo tem grande importância na cadeia energética mundial, a utilização dos seus derivados é essencial ao ser humano. Com o objetivo de melhorar o método de elevação e aumentar a produção de petróleo são utilizados geradores de vapor para injeção de vapor no reservatório, aquecendo a formação facilitando a fluidez do óleo. A partir da utilização dos equipamentos adequados, o presente trabalho teve por objetivo apresentar uma sugestão para melhorar a eficiência no controle de vazão nos geradores de vapor. Como resultado mostrou que a utilização de inversor de frequência por meio da variação de rotação e adequação do motor elétrico da bomba d'água, foi a aplicação que trouxe melhores resultados: melhor eficiência no processo em cerca de 60%, economia de energia, redução nos desgastes dos equipamentos, aumento da vida útil, economia financeira de 72.886,70 R\$ ao ano. Esses, por sua vez, pautados por uma análise de viabilidade econômica, na qual indica um retorno em aproximadamente 7 (sete) meses. É razoável recomendar a empresa a implantação desse método de controle proposto neste trabalho, com boas perspectivas de economia financeira.

Palavras-Chave: Gerador de Vapor. Controle de Vazão. Inversor de Frequência. Eficiência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Gerador de vapor.....	19
Figura 02 – Fluxograma do gerador de vapor.	19
Figura 03 – Processo de vaporização da água.	20
Figura 04 – Relação da temperatura com os poços injetores e produtores.....	22
Figura 05 - Contribuição dos mecanismos na injeção de vapor contínua.	23
Figura 06 – Comportamento do reservatório durante a injeção de vapor.	24
Figura 07 – Representação do gerador de vapor a gás	28
Figura 08 – Painel de controle.....	29
Figura 09 – Interface Homem-Máquina	31
Figura 10 – Controlador do queimador	32
Figura 11 – Bomba d’água	33
Figura 12 – Malha de controle de água	35
Figura 13 – Válvulas instaladas a jusante da bomba.	37
Figura 14 – Curva característica da vazão com controle através de válvulas a jusante	38
Figura 15 – Válvula instalada com recirculação	38
Figura 16 – Curva de vazão com válvula de recirculação.....	39
Figura 17 – Curva de vazão com associações de bombas em paralelo	40
Figura 18 – Curva característica da bomba com a variação da rotação	41
Figura 19 – Inversor de Frequência.....	43
Figura 20 – Representação interna do inversor de frequência.....	44
Figura 21 – Representação da metodologia do trabalho.....	50
Figura 22 – Conjunto motor elétrico e bomba d’água.....	54
Figura 23 – Válvula de recirculação PV – 004.....	55
Figura 24 – Analisador de energia Fluke 435.....	59

LISTA QUADROS E TABELAS

Quadro 01 – Especificação da qualidade da água para uso nos geradores de vapor.....	25
Quadro 02 – Distribuição das cargas nos geradores de vapor.....	27
Quadro 03 – Descrição do controle das chaves e botões no painel elétrico do GV	30
Tabela 01 – Motores elétricos adequados da bomba d'água.	58
Quadro 04 – Dados operacionais do GV antes das implementações	60
Tabela 02 – Medições no GV antes das implementações	60
Quadro 05 – Dados operacionais do GV após implementações.....	60
Tabela 03 – Medições no GV após implementações.....	61
Quadro 06 – Comparativo dos dados e ganhos	63
Tabela 04 – Levantamento dos custos.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UTA – Unidade de Tratamento de Água;

VSD - *Variable Speed Drive*;

OIP – *Oil in Place*;

°F – *Fahrenheit*;

CaCO₃ - Carbonato de cálcio;

P H - Potencial Hidrogeniônico;

Fe – Ferro;

O₂ – Gás Oxigênio;

CO₂ - Dióxido de Carbono;

°C – Grau Celsius;

ppm – Partes por milhão;

H₂S – Ácido Sulfídrico;

V – Volts;

VA – Volt Ampère;

CV – Cavalo Vapor;

VAr – Volt Ampère reativo;

MM BTU/H – Milhões de *British Thermal Unit* por hora;

IHM – Interface Homem Máquina;

SDV – *ShutDown Valve*;

PV – *process variable*;

FT – *Flow Transmission*;

FIC – *Flow Indicator Controller*;

CLP – Controlador Lógico Programável;

PC – *Personal Computer*;

MB – *Megabyte*;

RAM – *Random Access Memory*;

PID – Proporcional integral derivativo;

NFPA – *National Fire Protection Association*;

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora;

m³/h – Metro cúbico por hora;

RN – Rio Grande do Norte;

GV – Gerador de Vapor;

kgf/cm² - Quilograma-força por centímetro quadrado;

I – corrente;

A – Ampere;

Hz – Hertz;

MWh – Megawatt hora;

MTBF – *Mean Time between Failures*.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 GERAÇÃO DE VAPOR	18
3.2 PROCESSO DE VAPORIZAÇÃO DA ÁGUA	20
3.3 INJEÇÃO DE VAPOR	21
3.4 GERADOR DE VAPOR: INSUMOS	25
3.5 PARTES DE UM GERADOR DE VAPOR	27
3.6 CONTROLE DOS GERADORES	34
3.7 TIPOS DE CONTROLE DE VAZÃO DE ÁGUA	36
3.8 APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA	42
3.9 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS	46
4 METODOLOGIA	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE CONTROLE	53
5.2 ANÁLISE DO CONTROLE DOS GERADORES	55
5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO ALTERNATIVO DE CONTROLE	57
5.4 TESTE DE CONSISTÊNCIA	58
5.5 ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA	61
5.5.1 Convenções para base de cálculos	61
5.5.2 Ganhos quantitativos	62

5.5.3 Ganhos qualitativos	63
5.6 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	64
6 CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A ideia de utilizar o calor para melhorar a produtividade de poços petrolíferos é quase tão antiga quanto a indústria do petróleo. Consta que há patentes tratando disso datadas de 1865. Inicialmente, o objetivo na época era modesto: pretendia-se apenas limpar e remover dos poços de petróleo os depósitos de parafinas e asfaltenos, hidrocarbonetos saturados que dificultam a elevação do petróleo a superfície (SOUZA JÚNIOR, 2010).

Cerca de meio século depois, a indústria passou a utilizar esse calor, agora através de máquinas térmicas, denominadas de Gerador de Vapor (GV), na tentativa de aquecer deliberadamente o reservatório de petróleo. Há registros dessas experiências na Rússia, assim como nos Estados Unidos, ambas em meados da década de 1930 (SOUSA, 2010).

Atualmente, os países considerados como maiores usuários dessas máquinas térmicas são os Estados Unidos, a Venezuela, o Canadá e a Indonésia. Todos operam milhares de poços e centenas de geradores de grande porte. O Brasil possui cerca de 50 (cinquenta) geradores de vapor distribuídos entre os estados de Sergipe, Rio Grande do Norte e Bahia (NOBRE; MELO, 2011).

A máquina de estudo deste trabalho está restrito ao gerador de vapor com injeção em poços de petróleo terrestre, constituído das seguintes partes: um tubo de água dobrado, sistema de circulação induzida e tiragem de ar forçada. De forma genérica, o gerador de vapor constitui-se de um tubo de água dobrado, onde em uma extremidade temos a entrada de água fria, passando pelo processo de aquecimento por meio da câmara de convecção e radiação, na outra extremidade a saída de vapor com a qualidade, pressão e vazão especificada para os poços.

A transformação de água líquida em vapor pela absorção de calor obtido a partir da queima de um combustível, é um método de estimulação dos poços envolvendo a transferência de calor para o reservatório, com isso reduz-se a viscosidade do óleo e aumenta-se a sua mobilidade, facilitando a elevação do petróleo a superfície.

Normalmente, maneja-se o volume de água necessário por meio de diversas formas de controles diferentes. Bernardo (1989), aplicou o controle de vazão através do fechamento de registro na saída das moto bombas. Neste caso, há a introdução de perda de carga acidental na curva do sistema. Outra forma utilizada para manejo de água é através da recirculação do fluído

da descarga para a sucção. Esta prática é mais comum, porém proporciona desperdício de energia.

Uma das formas de se manejar adequadamente um sistema de bombeamento é alterar a rotação da bomba até a obtenção da vazão necessária, de acordo com as equações de Rateaux¹; o que não implica em introdução de perda de carga e desperdício de energia (CONZETT; ROBECHKEK, 1983).

Tiago Filho (1996), mostrou que um equipamento capaz de produzir este efeito com rapidez e eficiência é o inversor de frequência (VSD), que trabalha alterando a frequência da tensão aplicada ao motor, possibilitando controlar sua rotação.

Neste estudo, foram enfatizados de forma mais específica a vazão de água dos geradores de vapor, os tipos de controles mais usuais e a influência dessa variável na eficiência térmica e energética dessa máquina. Buscou-se assim a implementação em um sistema real de outras formas de controle de vazão comparando os resultados.

Na maioria das vezes, os projetos de sistemas de bombeamento utilizam-se de estruturas superdimensionadas em relação a demanda real do processo, com a premissa de uma margem de crescimento futura e de segurança. Nesse contexto, identifica-se a oportunidade de evitar gastos desnecessários com equipamentos que não são utilizados em sua plenitude, evitar desperdício de energia, reduzir o desgaste precoce dos componentes da bomba e melhorar a eficiência do processo. Em meio a esses aspectos, esse trabalho busca sugerir uma alternativa de controle de vazão com melhor eficiência para os geradores de vapor, onde irá fornecer a quantidade exata de água necessária ao processo, com perspectivas de redução no consumo de energia elétrica, economia financeira e aumento da vida útil dos equipamentos.

¹ Equações de Reautax, também conhecido como leis da semelhança relaciona a rotação (n), a vazão (Q) e altura manométrica (H) das bombas operando em diversos pontos.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo serão mostrados os objetivos desse trabalho, a princípio abordado com uma contextualização geral e após desenvolvidos em tópicos específicos.

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar uma proposta de controle de vazão como alternativa para melhorar o desempenho e a eficiência energética dos geradores de vapor utilizados em campos de petróleo terrestre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dada a importância do objetivo geral, 06 (seis) objetivos específicos podem ser elencados representando bem a especificidade do trabalho.

- a) Comparar os métodos de controle de vazão: restrição da sucção, recirculação e controle da rotação do motor;
- b) Analisar a viabilidade econômica da aplicação de inversor de frequência como controle de vazão;
- c) Verificar experimentalmente variações nas grandezas elétricas após aplicação de inversor de frequência.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda aspectos teóricos sobre a geração e injeção de vapor nos poços de petrolíferos, as principais variáveis que influenciam no processo de vaporização da água, as formas de controle de vazão e aplicação de inversor de frequência no controle da rotação de motores elétricos, embasando a pesquisa realizada.

3.1 GERAÇÃO DE VAPOR

A utilização do vapor foi um marco tecnológico que revolucionou a indústria e a sociedade em geral. Da mesma forma, os combustíveis fósseis tiveram e ainda têm grande importância nos dias atuais. Apesar de serem produtos relativamente antigos, seus processos de obtenção e utilização continuam sujeitos a constante adaptação e melhorias. Assim, a combinação desses elementos também é alvo de tais transformações.

O primeiro aspecto a ser apresentado nesse tópico é a geração de vapor. Esta acontece num gerador de vapor aquatubular de 01 (um) passo, com circulação forçada tanto de água quanto de ar, com uma única serpentina, com 01 (um) queimador horizontal montado sobre base móvel ou estacionário, gerando vapor saturado com purga contínua, totalmente automático com todos os controles operacionais e de segurança (SOUZA JÚNIOR, 2010).

De maneira simplificada, gerador de vapor podem ser entendidos como um só tubo de aço, com grande comprimento e pequeno diâmetro, que estão dobrados adaptando-se às diferentes formas de acordo com o modelo do fabricante. Por uma extremidade do tubo entra água fria que passa pelas câmaras de convecção e radiação onde são aquecidas por meio da queima de combustíveis, na outra extremidade sai vapor (SOUZA JÚNIOR, 2010).

A seguir ilustração de gerador de vapor com as características descritas anteriormente:



Figura 01 – Gerador de vapor.

Fonte: Autoria própria (2013).

A figura 01 ilustra um gerador de vapor mostrando a disposição dos equipamentos na base, com isso é possível associar a descrição e a definição abordadas conceitualmente. Para melhor entendimento do fluxo das etapas dentro do gerador, segue abaixo fluxograma:

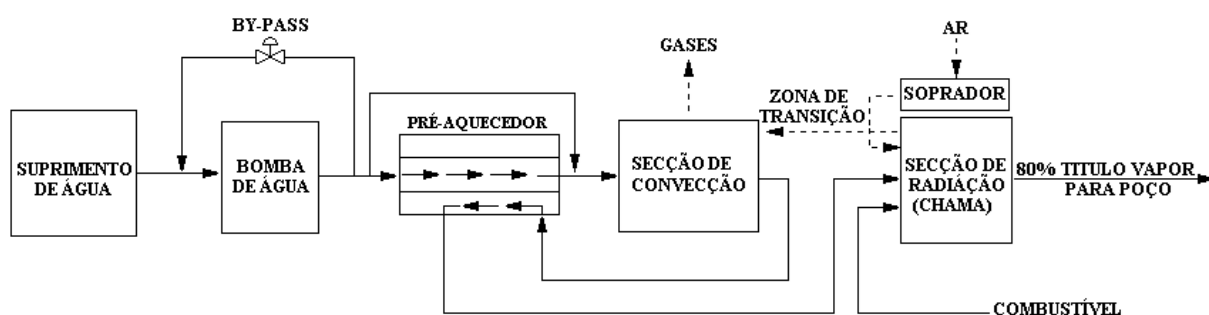


Figura 02 – Fluxograma do gerador de vapor.

Fonte: Souza Júnior, 2010.

Conforme mostra figura 02, o suprimento de água passa pela bomba d'água para elevar a pressão e o controle de vazão é realizado por meio da válvula de recirculação (*by-pass*), após a água é aquecida no pré - aquecedor, secção convecção e radiação, ao final temos a saída de vapor.

Nesse processo é possível perceber que a água é aquecida ao passar pelo tubo e em algum ponto do mesmo se inicia a vaporização que continua até obter-se o vapor na qualidade desejada, sendo necessário o entendimento da vaporização na geração de vapor.

3.2 PROCESSO DE VAPORIZAÇÃO DA ÁGUA

O objetivo de um gerador de vapor consiste na transformação de água líquida em vapor pela absorção de calor obtido a partir da queima de um combustível. Quando o calor é fornecido a uma certa massa de água, à pressão constante, observa-se o aumento da temperatura da água até que se inicie o processo de vaporização. A partir deste ponto não é observada mudança de temperatura até que a vaporização se complete, quando então qualquer transferência de calor adicional implicará no superaquecimento do vapor (THOMAS, 2004).

A temperatura na qual ocorre mudança de fase chama-se “temperatura de saturação” e a quantidade de calor necessária à mudança de fase, “calor latente de vaporização” ou “entalpia de vaporização” (THOMAS, 2004).

Segue ilustração com as etapas de vaporização da água:

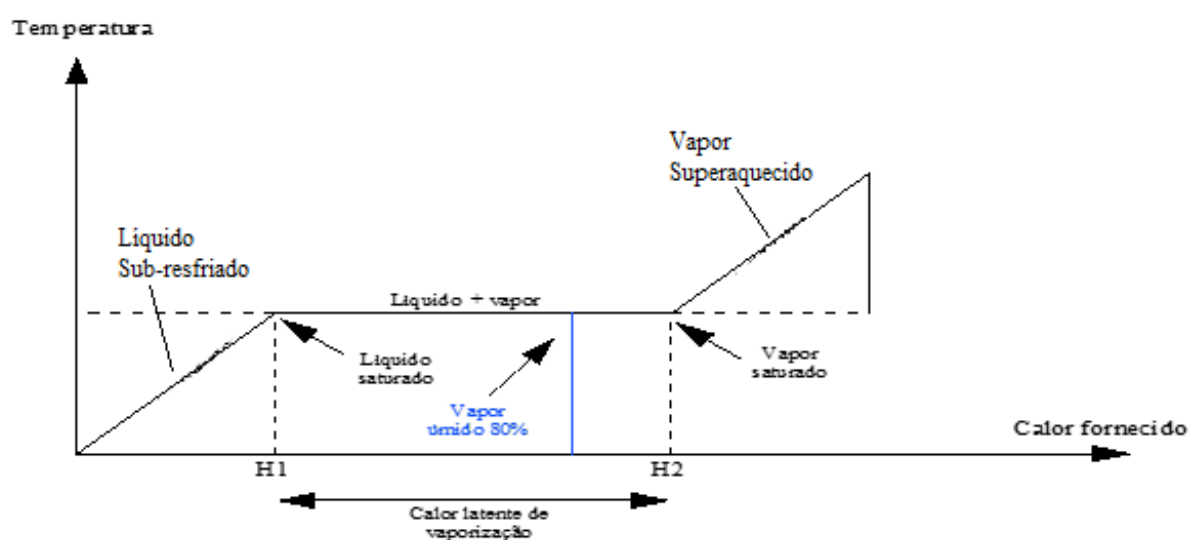


Figura 03 – Processo de vaporização da água.

Fonte: Adaptado Souza Júnior, 2010.

A quantidade de calor trocada pode ser medida pela variação de entalpia. Para uma pressão mais elevada, verifica-se que a vaporização se dá a uma temperatura mais alta e que quantidade de calor necessária ao processo é menor, já que a entalpia diminui com o aumento de pressão, existirá um ponto em que a vaporização não será caracterizada pela existência de um patamar de temperatura, isto é, a água experimentará mudança de fase com entalpia de vaporização nula, este ponto é denominado de crítico. As máquinas térmicas que geram vapor em pressão acima da crítica são conhecidas como “caldeiras supercríticas” (GALVÃO, 2008).

Nesta seção foi abordado o processo de vaporização da água, contemplando as etapas desde a água em temperatura ambiente até a transformação em vapor superaquecido. A próxima etapa após a geração de vapor é a injeção nos poços, afinal o objetivo desse método é melhorar o escoamento do petróleo. Dessa maneira será abordado nos tópicos subsequentes os aspectos pertinentes a esse processo.

3.3 INJEÇÃO DE VAPOR

A injeção de vapor é uma etapa que sucede a geração, sendo importante para o processo tenha sido realizado com êxito, principalmente a vaporização da água, uma vez que a qualidade do vapor a ser injetado nos poços dependem necessariamente dessas etapas. Um vapor bem especificado é fundamental para que os poços petrolíferos possam dar um melhor retorno de óleo, ou seja, consiga aquecer o reservatório e o petróleo possa fluir com maior facilidade.

Tal processo consiste em injetar vapor num poço central com o objetivo de deslocar o óleo na direção dos poços periféricos. Nesse método, são separados os poços injetores² e produtores³. O calor proveniente do vapor injetado reduz a viscosidade do óleo, quando o fluido injetado drena o óleo do poço injetor para o produtor. Quando o vapor se desloca através do reservatório, cria várias regiões de diferentes temperaturas e saturações de fluidos (SANTOS et. al., 2010). Conforme ilustrado posteriormente:

² Poços injetores: são reservatórios que são separados para injetar vapor na formação e aquecer o reservatório dos poços vizinhos.

³ Poços produtores: são os reservatórios que produzem petróleo, onde não são utilizados para injeção de vapor.

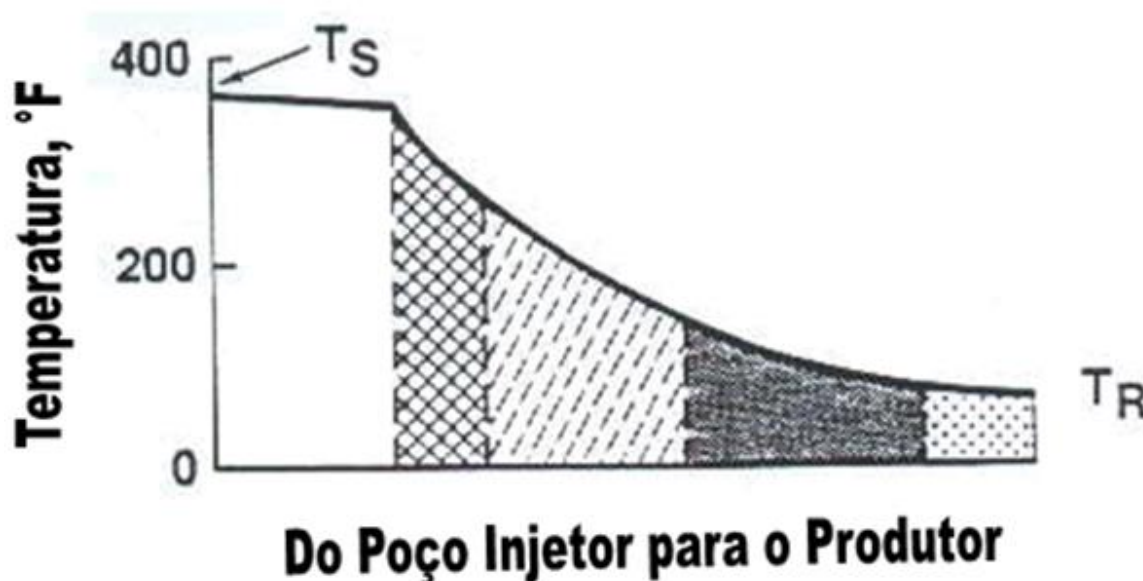


Figura 04 – Relação da temperatura com os poços injetores e produtores.

Fonte: Souza Júnior, 2010.

A figura 04 mostra a gradual transição de temperatura de vapor do poço injetor para o reservatório no poço produtor. Quando o vapor penetra na formação, este forma uma zona de vapor saturado em torno do poço, esta zona com temperatura aproximada da injeção, expande-se à medida que mais vapor é injetado. O vapor se condensa quando perde calor para a formação e forma a zona de condensado quente. Esta, deslocada pela injeção contínua de vapor, transmite calor para as regiões mais frias, distantes do poço injetor. Finalmente, com a perda de calor para a formação, a temperatura do condensado é reduzida para a temperatura inicial do reservatório (QUEIROZ et. al., 2005).

Em cada uma dessas regiões, ocorrem vários mecanismos de recuperação, com diferentes graus de importância, que depende do tipo de óleo. Por exemplo, a redução de viscosidade pode ser o mais importante na recuperação de óleos pesados, enquanto que a destilação do vapor e liberação do gás podem contribuir mais para os óleos leves (CAMPOS, 2013).

A depender do tipo de óleo e seus derivados serão definidos os mecanismos de recuperação, que variam conforme temperatura, viscosidade e propriedades químicas do hidrocarboneto.

Na figura 05 será ilustrado a contribuição de cada mecanismo na recuperação de óleo:

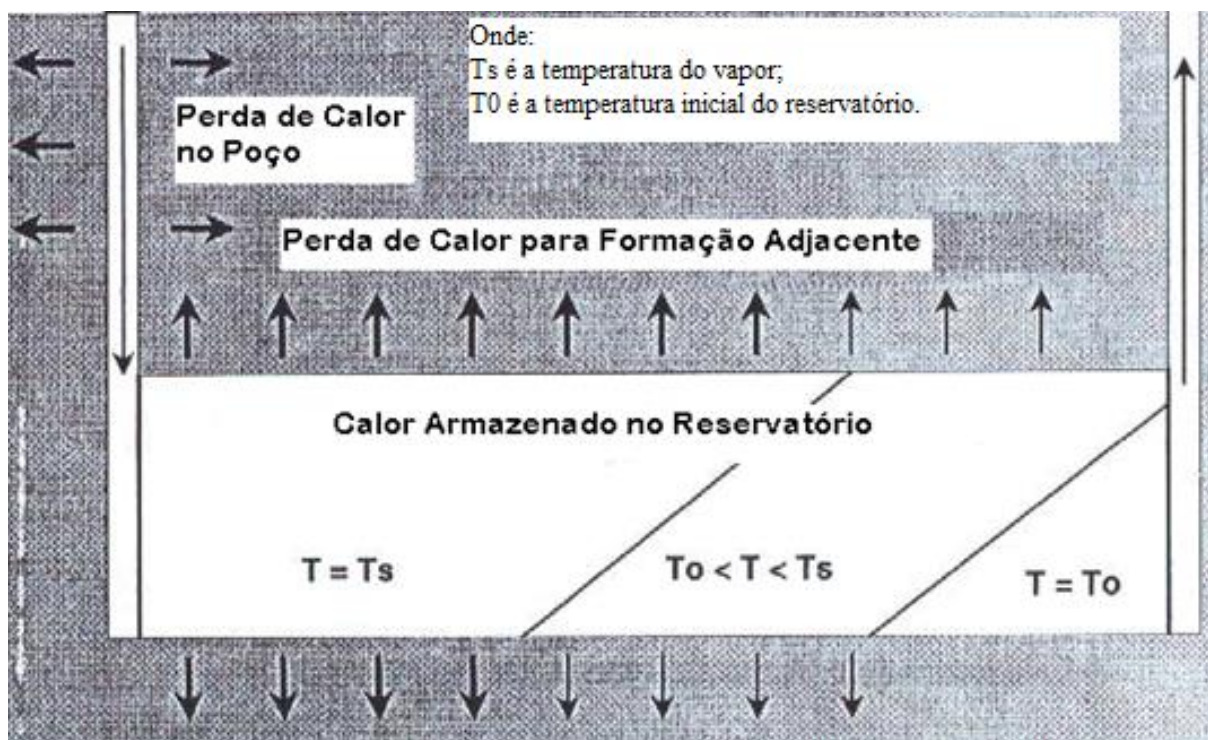


Figura 05 - Contribuição dos mecanismos na injeção de vapor contínua.

Fonte: Adaptado Souza Júnior, 2010.

No processo de injeção do vapor alguns parâmetros são relevantes, a seguir serão destacados os principais (RODRIGUES, 2008).

a) Pressão

A pressão do reservatório deve ser a menor possível para se obter uma liberação maior do calor latente. Na injeção também deverá ser baixa, porque isso implica em menor temperatura no revestimento e conseqüentemente menor tensão. Outra vantagem de pequenos valores de pressão é a formação de uma frente de deslocamento mais estável.

b) Vazão

O volume de vapor injetado nos poços é medido diariamente, até que seja atingido a cota prevista. O acompanhamento dessa grandeza é imprescindível para uma resposta positiva do reservatório a injeção de vapor.

c) Qualidade ou Título de Vapor

Título é a razão entre o peso do vapor saturado seco e vapor saturado seco mais a umidade contida na mistura. É um indicativo da qualidade do vapor, ou seja, mede a quantidade de umidade contida no vapor saturado, sendo que quanto menor o valor percentual, maior será

a quantidade de umidade contida no vapor. Indica a qualidade do vapor, é importante que a medição realizada seja com amostra dos poços injetores.

d) Temperatura

Essa variável é responsável em aquecer o reservatório vizinhos, sendo assim, importante monitorar os valores de temperatura na chegada dos poços injetores, dessa maneira é possível idêntica a perda de calor nas tubulações durante o percurso gerador/poços.

e) Tempo

É um fator limitante devido à perda de calor para as formações adjacentes. Estudos apresentam que 6 (Seis) anos de injeção em um mesmo reservatório parece ser excessivo, mas depende muito do comportamento dos mesmos. Conforme representação a seguir:



Figura 06 – Comportamento do reservatório durante a injeção de vapor.

Fonte: Santana, 2009.

Analisando a figura 06, é possível identificar que no processo inicial de injeção existe uma transferência de calor no poço, durante o percurso do mesmo até o reservatório. Na verdade essa transferência de calor é considerada indesejada, ou seja, uma perda, a transferência desejada ocorre dentro do reservatório entre as formações.

Visto o detalhamento das etapas presente no processo de geração, injeção e vaporização, se faz necessário a compreensão da parte operacional do sistema: equipamentos, máquinas e insumos necessários a esses processos.

3.4 GERADOR DE VAPOR: INSUMOS

O vapor é um dos principais meios de transporte de calor para processos industriais, com aplicação em diversas áreas: fábricas de bebidas, laticínios, biotecnológicas, farmacêuticas, petrolíferas, dentre outras.

A geração de vapor pode ocorrer por meio de diversas máquinas térmicas, em particular, esse projeto se restringe as aplicações com gerador de vapor. Nesse tópico serão abordados os insumos necessários para o funcionamento adequado dessa máquina. Para o melhor desempenho dos geradores é importante que a matéria prima e as máquinas estejam dentro das especificações e funcionando corretamente.

Segundo Souza Júnior (2010), os principais insumos necessários para o funcionamento dos geradores são:

a) Água

A vida útil do gerador é também função da qualidade da água de alimentação, ou seja, quanto mais pura for a água, maior a expectativa de vida útil do equipamento. A água enviadas ao geradores passam por um tratamento na Unidade de Tratamento de Água (UTA) para eliminar a dureza. Segue especificações que a água deve apresentar na alimentação do GV:

Quadro 01 – Especificação da qualidade da água para uso nos geradores de vapor.

Grandezas	Valores recomendados
Temperatura	15 a 60 °C
Dureza total (CaCO ₃)	0,0 ppm
P H	8,5 a 9,5 (máximo)
Cloro livre	0,0 ppm (máximo)
Ferro (Fe)	2,0 ppm (máximo)
Alcalinidade total (CaCO ₃)	80 a 200 ppm
Oxigênio livre (O ₂)	0,05 ppm (máximo)
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,0 ppm
Turbidez	5 unidades Jackson
Total de sólidos dissolvidos (DS)	3000 ppm máximo (esporádico)
Sulfito residual	20 a 40 ppm
Óleo/Graxa	0,0 ppm

Fonte: Adaptado de Souza Júnior, 2010.

O termo água dura foi originado em razão da dificuldade de lavagem de roupas, com águas contendo elevada concentração de certos íons minerais. Esses íons reagem com sabões formando precipitados e evitam a formação de espuma.

Essa água é imprópria para o abastecimento de equipamentos geradores de vapor, pois o cálcio e magnésio possuem características naturais de se agregarem nas paredes das tubulações.

É importante ressaltar, que caso a água esteja fora das especificações mostradas acima, em particular, o magnésio e cálcio em altas temperaturas podem cristalizar-se formando incrustações, causando sérios danos, tais como: diminuição da eficiência na geração do vapor e aumento da temperatura de película do metal, além da possibilidade de rompimento de tubos e explosões.

b) Gás Combustível

O gás a ser fornecido deve ser isento de líquidos e/ou partículas sólidas. A presença destas impurezas pode ser detectada pela presença de “fagulhas” na chama. Gases contendo enxofre (H_2S) irão causar uma redução na vida útil dos elementos aletados da convecção, do queimador e da linha de gás.

A composição do gás a ser fornecido deve ser a mais estável possível, visto que uma variação da mesma provoca alteração da relação ar/combustível.

c) Ar de Combustão

O ar utilizado nos geradores de vapor é admitido por meio de duto de sucção, localizado sobre o teto da parte frontal do equipamento. O ar ambiente nas proximidades do equipamento deve ser isento de produtos corrosivos provenientes de chaminés, tochas de segurança e fontes químicas.

A tela de proteção da tomada de ar deve ser inspecionada e limpa periodicamente para evitar a sua obstrução, principalmente em locais onde existem grande incidência de insetos voadores.

d) Energia Elétrica

Os geradores de vapor possuem circuitos elétricos alimentados por meio de um transformador exclusivo, de 13,8 KV / 440 V, com potência variando entre 225 e 150 KVA, a depender das cargas instaladas. O tipo de proteção elétrica utilizada depende da necessidade de cada equipamento: potência dos motores, tipos de acionamento e criticidade operacional.

Segue quadro com o detalhamento das cargas instaladas nos GVs:

Quadro 02 – Distribuição das cargas nos geradores de vapor.

Gerador	Descrição do sistema elétrico			
50 MMBTU/H		Soprador	Bomba d'água	Compressor de ar
	Potência	40 CV	200 CV	15 CV
	Tipo de Acionamento	Soft Starter	Compensadora	Partida Direta
25 MMBTU/H		Soprador	Bomba d'água	Compressor de ar
	Potência	30 CV	100 CV	15 CV
	Tipo de Acionamento	Soft Starter	Compensadora	Partida Direta

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

O gerador de vapor analisado nesse estudo possui as seguintes características: potência de 50 MMBTU/H, motor do soprador de 40 CV e compressor 15 CV ambos com partida direta, a bomba d'água têm um motor de 200 CV com acionado por meio de partida compensadora. Esses equipamentos citados são apenas uma parte, existem outros que serão identificados no decorrer do trabalho.

3.5 PARTES DE UM GERADOR DE VAPOR

Os geradores de vapor são máquinas térmicas robustas, funcionam em regime de trabalho praticamente interrupto, com paradas programadas apenas para substituição dos poços injetores e manutenção dos equipamentos. Dentro desse tópico serão detalhados os principais equipamentos, aplicação e importância no funcionamento dos geradores de vapor.

A maioria dos geradores diferem entre si de acordo com a capacidade, pressão de operação e grau de automação. Desta forma seus princípios básicos de projeto, operação e controle são semelhantes, permitindo desta maneira uma descrição generalizada de suas partes e componentes.

A maior interação e controle dos geradores são realizados pelos operadores, que diariamente precisam fazer ajustes no processo. Essa interface do operador com o gerador é

possível devido o painel de controle, botões de acionamento, chaves de seleção de modo de operação e uma interface gráfica homem-máquina (ROSA et. al., 2006).

Segundo Nobre e Melo (2011), utilizando os critérios de relevância, criticidade e interação com o operador, os geradores de vapor podem ser divididos distribuídos da seguinte forma:

- a) Painel Elétrico;
- b) Interface Homem Máquina (IHM);
- c) Bomba de Alimentação;
- d) Programador de Combustão;
- e) Pré - aquecedor;
- f) Zona de Convecção;
- g) Zona de Radiação/Transição;
- h) Compressor de Ar.

A seguir será ilustrado as principais partes mencionadas nesta seção:

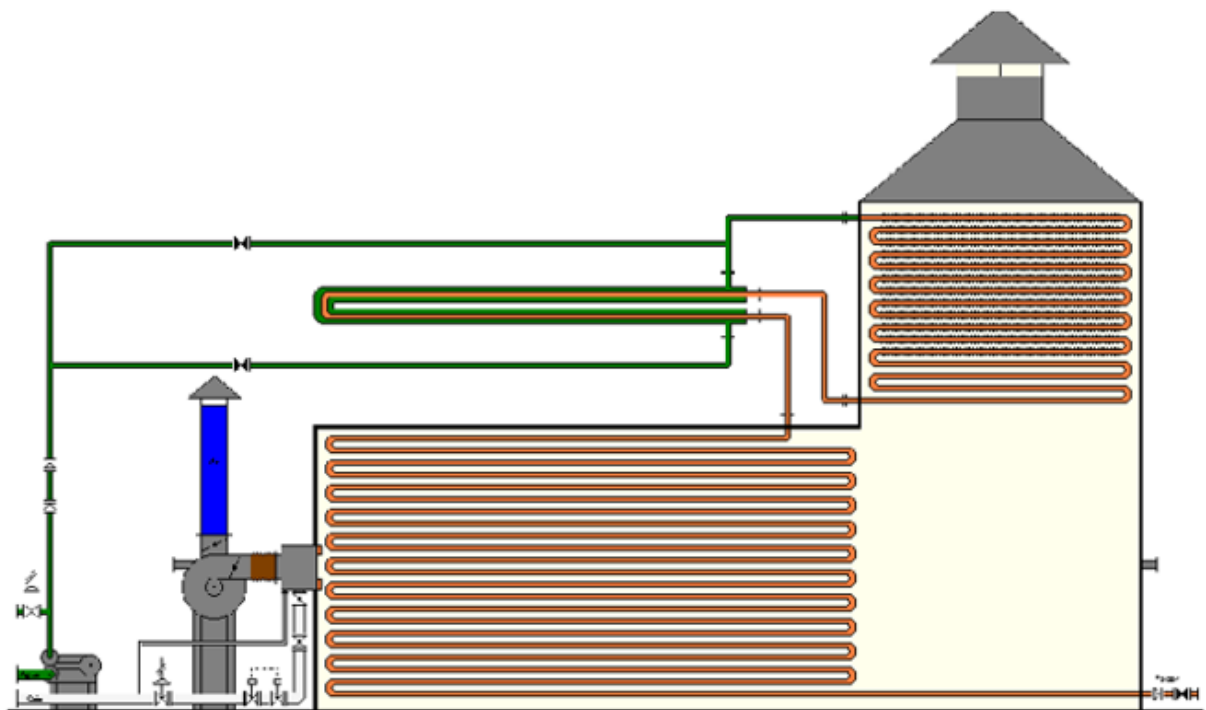


Figura 07 – Representação do gerador de vapor a gás

Fonte: Souza Júnior, 2010.

Na figura 07 é possível identificar a disposição dos equipamentos ao longo do gerador de vapor, mostrando a complexidade no processo operacional e quantidade de acessórios.

Para desenvolvimento desse trabalho serão detalhados alguns equipamentos e partes do gerador de vapor que se relacionam na aplicação desse estudo, conforme descrição abaixo:

a) Painel de Controle

O painéis elétricos são autoportantes e totalmente independentes um do outro. Neles estão situados todos os controles elétricos, incluindo a parte de força que irá acionar os motores e o controle de automação, contendo os anunciadores de alarme, comutadores de comando e botoeiras de rearme do sistema de segurança, interface homem – máquina (SOUZA JÚNIOR, 2010).

A figura 08 ilustra um modelo de painel elétrico utilizados nos geradores de vapor:



Figura 08 – Painel de controle

Fonte: Autoria própria.

Conforme Nobre e Melo (2011), nesses painéis estão disponíveis todos os controles necessários ao gerador de vapor, são eles:

Quadro 03 – Descrição do controle das chaves e botões no painel elétrico do GV

Chave de Seleção/ Botão de controle	Funcionamento
Bomba d'Água	<u>Manual</u> - abre a válvula de bloqueio (SDV-010) e aciona bomba d'água após confirmação de válvula aberta. <u>Automático</u> - aciona entrada do CLP, solicitando abertura de válvula de bloqueio (SDV-010) e acionamento da bomba d'água.
Soprador	<u>Manual</u> - aciona soprador. <u>Automático</u> - aciona soprador controlando pelo CLP
Compressor	<u>ON</u> - liga compressor, aciona controle pelo CLP. <u>OFF</u> - Desliga compressor.
Sistema de Controle	<u>ON</u> - habilita controlador do queimador, cartões do CLP e fonte de 24Vcc para instrumentos sistemas de segurança. <u>OFF</u> - Desliga o sistema de controle do gerador.
Botão Iniciar	Habilita sequência de acionamento do gerador se não houver alarmes.
Botão Parar	Desliga o gerador colocando-o no estado de pós-purga.
Botão Rearme	Efetua um <i>reset</i> no controlador do queimador e reconhece os alarmes existentes no CLP, permitindo uma nova partida.
Botão Emergência	Desliga imediatamente a energia elétrica do gerador, colocando-o em estado inativo.

Fonte: Autoria própria.

b) Interface Homem – Máquina (IHM)

Quase todas as variáveis de processo adquiridas pelo sistema de controle são visualizadas graficamente em uma interface homem-máquina. O gerador de vapor abordado nesse estudo utiliza como interface os seguintes equipamentos: computador industrial padrão PC, modelo *View Plus 1000*, memória RAM e Flash com 64 MB ambas, software de supervisão *RSView* e driver de comunicação *RSLinx* (NOBRE; MELO, 2011). Essas características podem ser observado na figura 09:



Figura 09 – Interface Homem-Máquina

Fonte: Autoria própria.

É importante ao manusear a Interface Homem - Máquina ter os mesmos cuidados destinados a um computador pessoal, principalmente evitando desligamentos bruscos por meio da retirada do cabo de alimentação.

Segundo Nobre e Melo (2011), essas interfaces possuem um sistema de supervisão e monitoramento divididos em 3 (três) níveis de acesso, conforme grau de importância e necessidade de interação com a mesma.

Os níveis de acesso Operação, Manutenção e Administração são definidos a partir do nome de usuário usado e atribuídos diferentes níveis hierárquicos dentro do sistema. Segue abaixo as atribuições inerentes a cada perfil:

- Operação: visualizar todas as variáveis; ajustar os valores dos *setpoints* de vazão de água, nível de oxigênio, razão gás/água; reconhecer alarmes.

- Manutenção: ajustar parâmetros dos controladores PID's; Ajustar valores de *setpoints* de alarmes; definir valores de *trip* de segurança.

- Administração: ajustar os tempos de pré-purga, pré-ignição e pós-purga; acesso a todos os níveis; cadastrar usuários e senhas.

c) Programador de Combustão

Conforme Nobre e Melo (2011), o controle do queimador nos geradores de vapor devem ser efetuado por um dispositivo que cumpra algumas recomendações normativas (NFPA-85 e NBR-12313), dentre as principais temos:

- Monitoramento de falhas internas (energia, memória, E/S, processador);
- Tolerância à falha;
- Impossibilidade de alterações da lógica de funcionamento.

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLP) de alto desempenho atendem aos dois primeiros requisitos, mas não atende ao terceiro, ou seja, não devem ser utilizados para controle de chama no queimador, dessa maneira necessita a instalação de controladores dedicados (NOBRE; MELO, 2011). A seguir ilustração de um modelo de controlador de chama do GV:



Figura 10 – Controlador do queimador

Fonte: Autoria própria.

O gerador de vapor abordado nesse trabalho utiliza programador de combustão ou controlador do queimador da série RM7800 da *Honeywell*, sendo este responsável pelo procedimento de partida e parada, controlando a abertura das válvulas de bloqueio das linhas de combustível, o acionamento da vela de ignição, a supervisão da chama no interior do queimador e monitoramento da chama.

d) Bomba de Alimentação de Água

Nos geradores de vapor a bomba de água deve ser projetada para vencer no mínimo uma contrapressão igual à máxima pressão de saída de vapor mais as perdas de carga do sistema. A vazão deve ser consistente com o tamanho do gerador e com a quantidade máxima de calor liberado pelo queimador (ROSA et. al., 2006). A seguir, temos uma ilustração de um modelo de bomba d'água utilizada nos geradores de vapor:



Figura 11 – Bomba d'água

Fonte: Autoria própria.

Na aplicação desse trabalho os geradores de vapor estão equipados com bomba d'água do tipo alternativa, com deslocamento positivo, cinco estágios, pressão de trabalho de 100 kgf/cm² e fabricante *WHEATLEY*.

Nesta seção foi possível identificar os principais equipamentos que compõem um gerador de vapor, sua importância e interação na produtividade dessa máquina. Para que seja possível propor melhorias e/ou alternativas no funcionamento desses equipamentos é importante conhecer as formas de controle do gerador e qual a relação dos mesmos com a vazão dos geradores de vapor.

3.6 CONTROLE DOS GERADORES

Os geradores de vapor são máquinas térmicas complexas em seu funcionamento, são muitas variáveis que precisam ser monitoradas e corrigidas, a saber: vazão, temperatura, oxigênio, combustão, ar comprimido, pressão, título de vapor, gás, dentre outros.

Nessa perspectiva o sistema de controle nos geradores de vapor são considerados essenciais e imprescindíveis para o bom desempenho dessa máquina. Ao iniciar o funcionamento do gerador as diferentes subsistemas (malhas) de controle são acionadas pelo CLP para monitorar e corrigir as variáveis do processo com o objetivo de produzir vapor na quantidade e qualidade especificada, sempre mantendo a segurança operacional (NOBRE; MELO, 2011).

Segundo Nobre e Melo (2011), os geradores possuem diversos subsistemas de controle, as principais serão listadas a seguir:

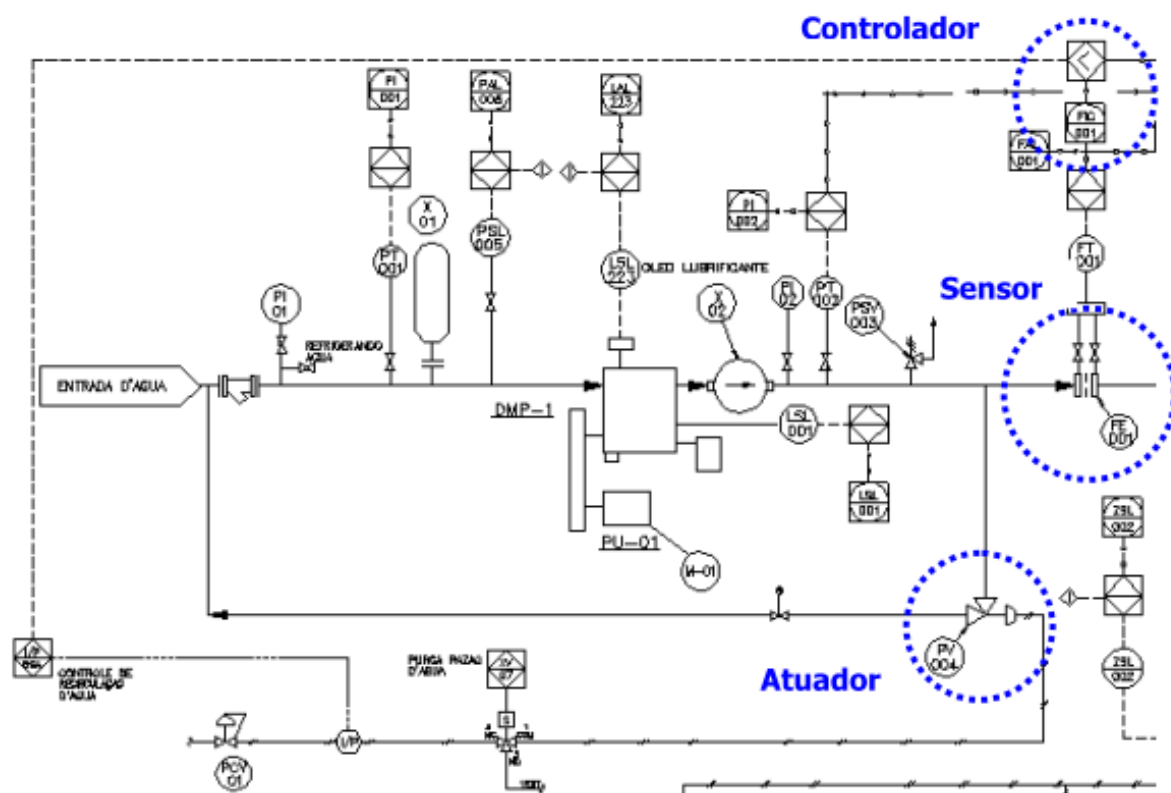
- a) Controle de vazão de água de alimentação;
- b) Controle de vazão de combustível;
- c) Controle de pressão de combustível;
- d) Controle de pressão de vapor;
- e) Controle de qualidade do vapor (título);
- f) Controle de concentração de O₂ nos gases de exaustão;
- g) Controle de temperatura de água de pré-aquecimento.

Diante da quantidade de subsistemas presentes no controle dos geradores vapor este trabalho não irá detalhar cada uma delas, bem como o fato que algumas não possuem relação com a aplicação de estudo proposta nesta pesquisa.

Em particular será abordado o subsistema de controle de água de alimentação, uma vez que o objeto de estudo proposto nesse trabalho irá interagir diretamente com essa malha, sendo necessário conhecer a suas especificidades, princípio de funcionamento e manipulação das suas grandezas.

Um dos parâmetros especificados pelo operador antes de iniciar a operação de um gerador de vapor é a vazão de água em m^3/h , cujo valor é usado como *Setpoint* deste subsistema de controle. O elemento sensor é o medidor de vazão FT-001, o atuador é a válvula de controle PV-004 e o controlador é o FIC-001 (NOBRE; MELO, 2011).

Na ilustração da figura 12, tem-se a descrição do subsistema de controle de água, sendo possível verificar o seu funcionamento:



Por meio da figura 12 é possível perceber que a válvula de controle PV-004 efetua a recirculação de água entre a descarga e sucção da bomba, ajustando a vazão medida à vazão especificada pelo operador, bem como regulando a pressão do sistema água/vapor.

A baixa vazão de água pode levar a produção de vapor superaquecido e a falta total de água leva a fundição dos tubos em cerca de 20 minutos. Para que isso não ocorra é recomendado uma vazão mínima de água de aproximadamente 4 m³/h para os geradores de 25MM de BTU/h e 6 m³/h para os de 50MM de BTU/h) (NOBRE; MELO, 2011).

Diante do exposto foi possível conhecer alguns dos principais subsistemas de controle dos geradores de vapor, em particular, o controle de água de alimentação que terá interação maior com este trabalho. Para que se possa discutir alternativas e propor sugestões nessa malha é importante conhecer os diferentes métodos de controle praticados em sistemas semelhantes de controle de vazão, suas vantagens e desvantagens.

3.7 TIPOS DE CONTROLE DE VAZÃO DE ÁGUA

A água é um recurso natural não renovável imprescindível a humanidade. Mas sua aplicação não se restringe apenas há benefícios ao ser humano, sua aplicação nos processos produtivos são estão presentes no cotidiano das empresas. Por representar um bem de valor intangível as organizações e as pessoas os processos produção, tratamento, armazenamento e utilização da água devem possuir controle de vazão adequados, evitando desperdícios e o emprego inadequado desse bem.

Nesse tópico serão abordados as diversas formas e métodos de controle utilizados para controle de vazão de água, contemplando o princípio de funcionamento, vantagens e desvantagens, sempre buscando aplicações realizadas em sistemas semelhantes a esse trabalho.

Segundo Azevedo Netto e Alvarez (1991), o controle de vazão por meio do fechamento de válvula na saída das moto bombas são uma das práticas mais utilizadas no setor de irrigação, sendo que um dos principais problemas desse método há introdução de perda de carga acidental no sistema, causando desperdício de energia no sistema.

Outra forma de se manejar adequadamente um sistema de bombeamento visando controlar a vazão de água é por meio da variação da rotação do motor, ou seja, aumentando a rotação do motor, haverá um incremento na vazão. Esse método não implica em introdução de perda de carga adicional ao sistema (Conzett; Robechek, 1983).

Segundo Tsutyia (2001), os principais métodos de controle de vazão podem ser realizados por meio de manobras de válvulas, número de bombas em operação e variação da rotação das bombas.

A seguir será ilustrado as características desses métodos e a influência deles sobre o controle de vazão de água:

a) Manobras de Válvulas

O controle de vazão por meio de válvulas normalmente são utilizados em sistemas de pequena complexidade, em baixas pressões e onde não requer um controle tão preciso, pois inserem uma perda de carga considerável ao processo.

As válvulas podem ser instaladas na descarga das bombas de água controlando a pressão e vazão de saída, ou ainda na descarga interligando-a com a sucção (*by-pass*).

Em seguida tem-se ilustrações das válvulas localizadas na descarga das bombas e a curva características do equipamento:

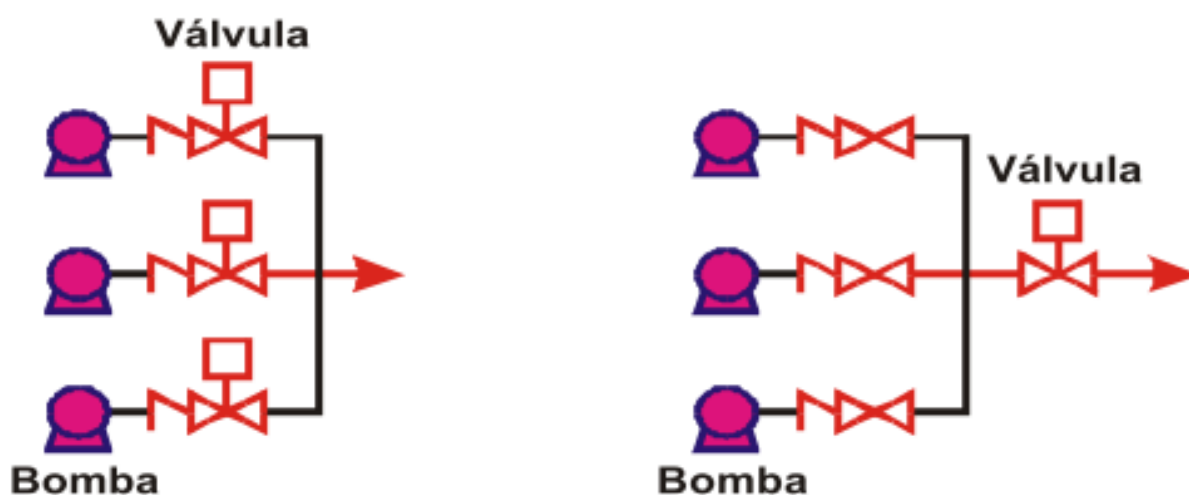


Figura 13 – Válvulas instaladas a jusante da bomba.

Fonte: Tsutyia, 2001.

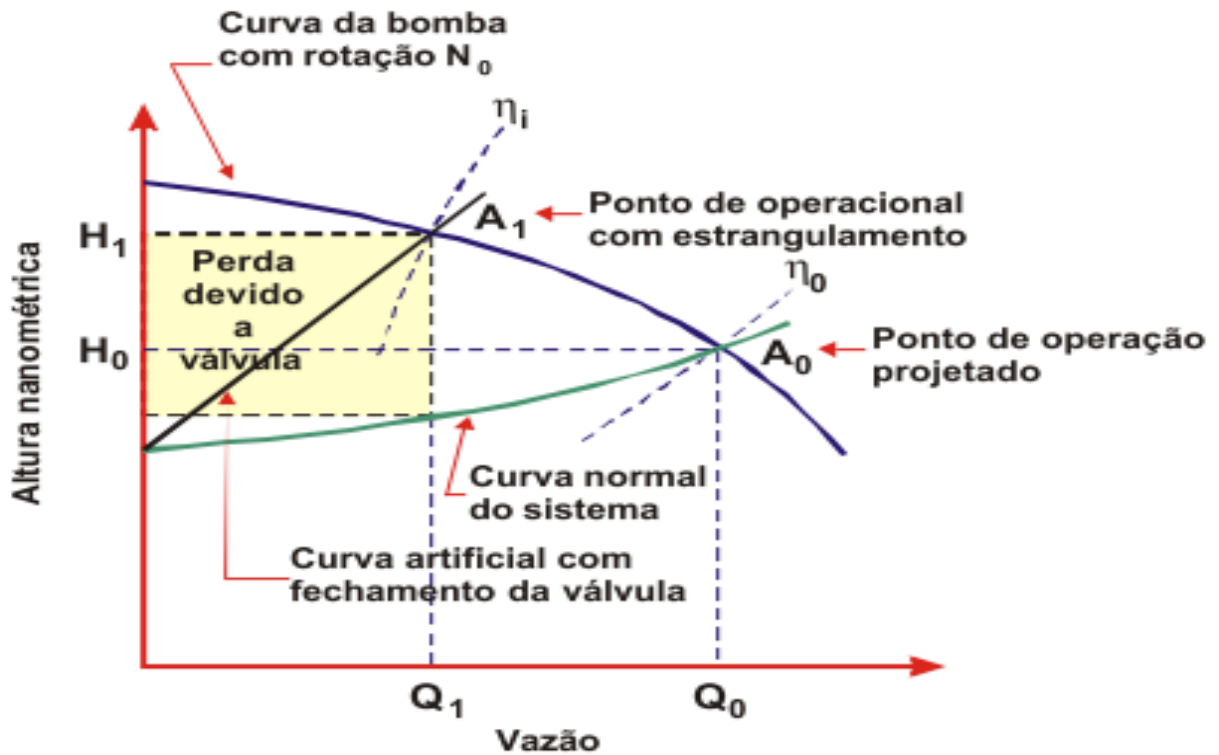


Figura 14 – Curva característica da vazão com controle através de válvulas a jusante

Fonte: Tsutiya, 2001.

Outra método de controle por meio de válvula é instalando-a na função de recirculação entre a sucção e a descarga. Segue ilustração representando a instalação desse válvula e mostrando comportamento da curva característica da bomba nessa configuração:

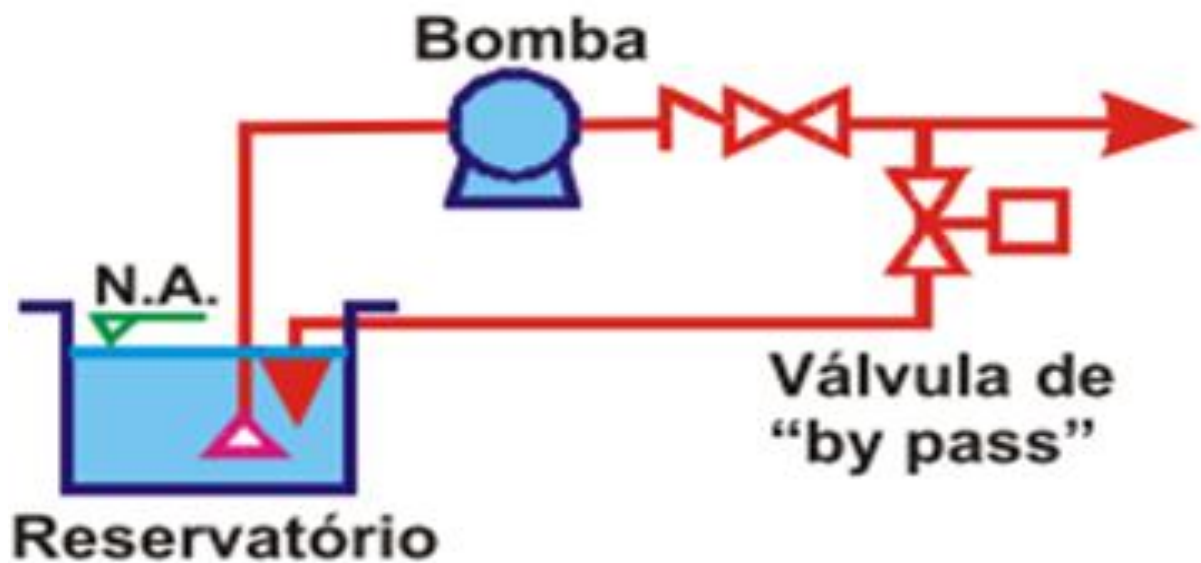


Figura 15 – Válvula instalada com recirculação

Fonte: Tsutiya, 2001.

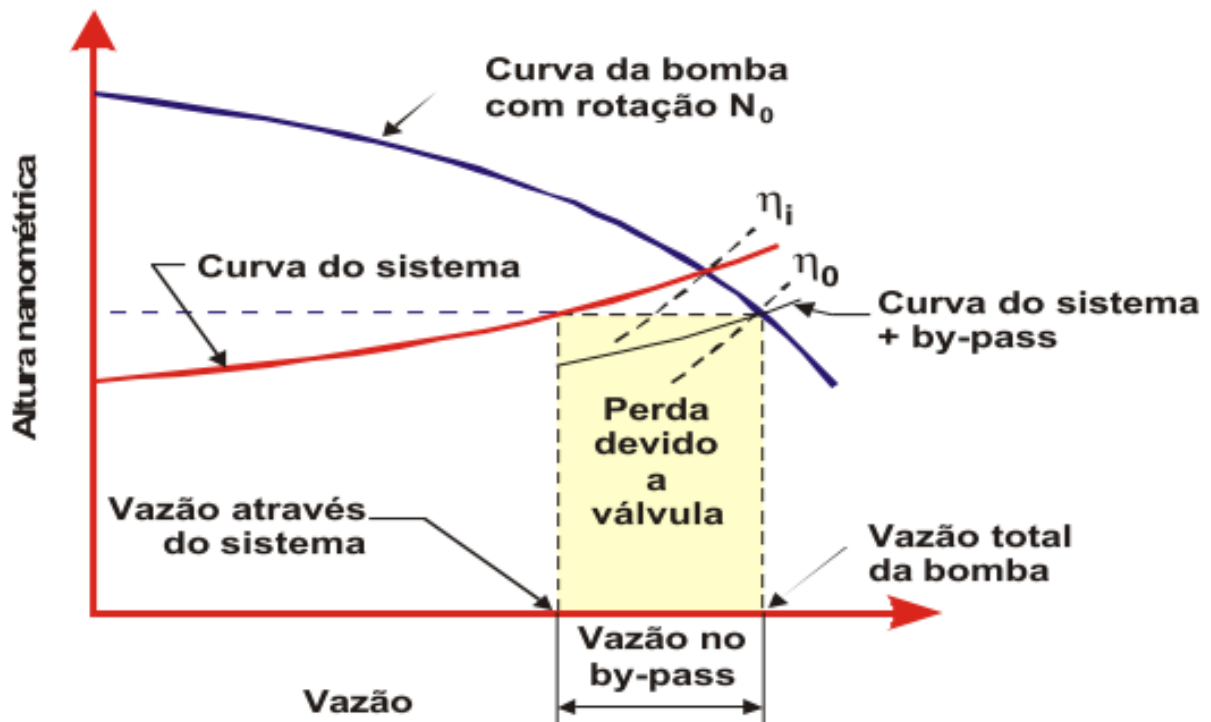


Figura 16 – Curva de vazão com válvula de recirculação

Fonte: Tsutiya, 2001.

Analisando as ilustrações 14 a 16, é possível identificar que o método de controle por válvulas que seja por restrição ou recirculação apresenta perdas consideráveis, no primeiro (figura 14) é possível identificar a presença de perda de pressão proveniente da estrangulação da válvula, no segundo (figura 15 e 16) é observado a perda de vazão oriunda da recirculação do fluído.

b) Número de bombas em operação

Mediante necessidade do processo produtivo uma alternativa utilizada no controle de vazão é alternar o número de bombas em funcionamento, ou seja, aumentar ou diminuir quantidade de equipamentos em paralelo como método de controle de vazão.

Na ilustração a seguir temos a representação das bombas instaladas em paralelo e o comportamento das variáveis nessa configuração:

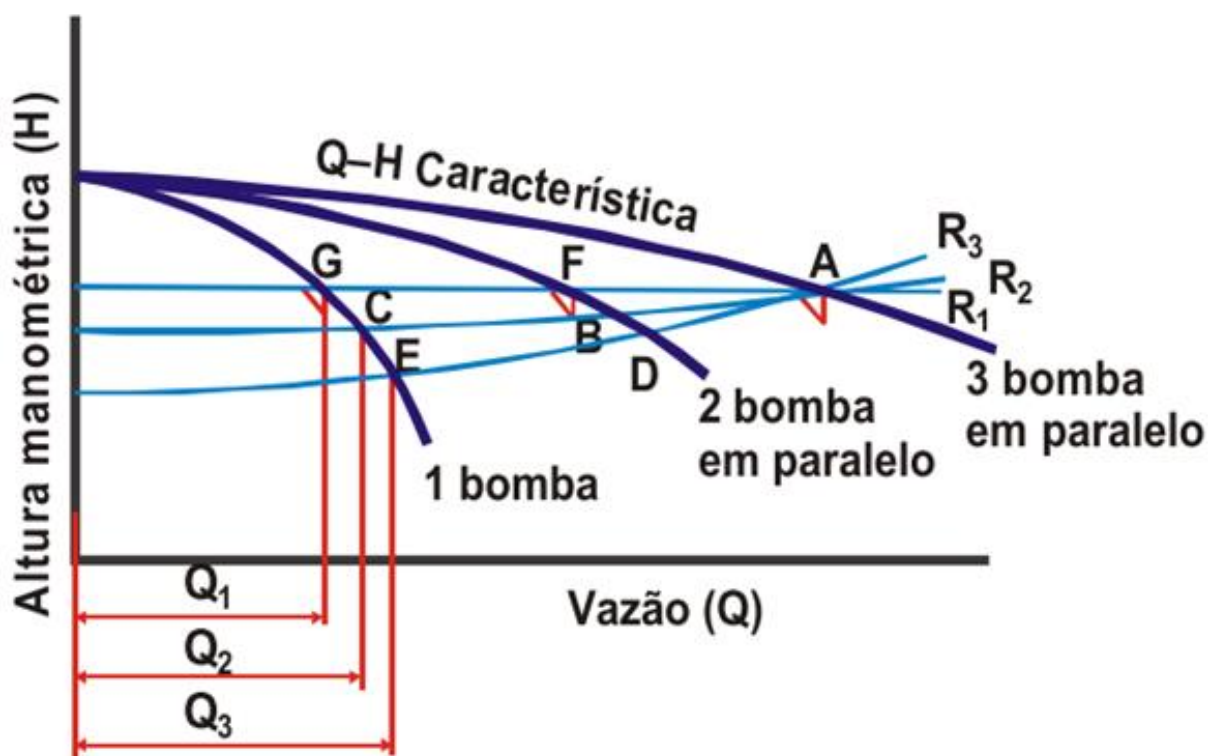


Figura 17 – Curva de vazão com associações de bombas em paralelo

Fonte: Tsutiya, 2001.

Mediante análise da figura 17, é possível perceber que nessa configuração, ao acrescentar bombas ao processo há um incremento na vazão e pressão do sistema. Esse tipo de método de controle de vazão possui aplicação normalmente para garantir uma vazão mínima ao processo, ou seja, funcionando como equipamento reserva, já para controle de vazão possui como principal dificuldade a impossibilidade de realizar ajustes finos na vazão, uma vez que o controle se dá de forma discreta, não sendo possível realizá-lo de forma contínua.

c) Variação da rotação das bombas

Um dos métodos bastante utilizados para controle de vazão é por meio da variação da rotação da bomba, pois apresenta grandes vantagens: possibilita ajustes, maior flexibilidade ao sistema, não apresenta perda de carga adicional ao processo e atualização contínua das tecnologias aplicadas.

Será ilustrado a relação existente entre as principais variáveis da bomba e o seu comportamento em diferentes rotações do equipamento, tais como:

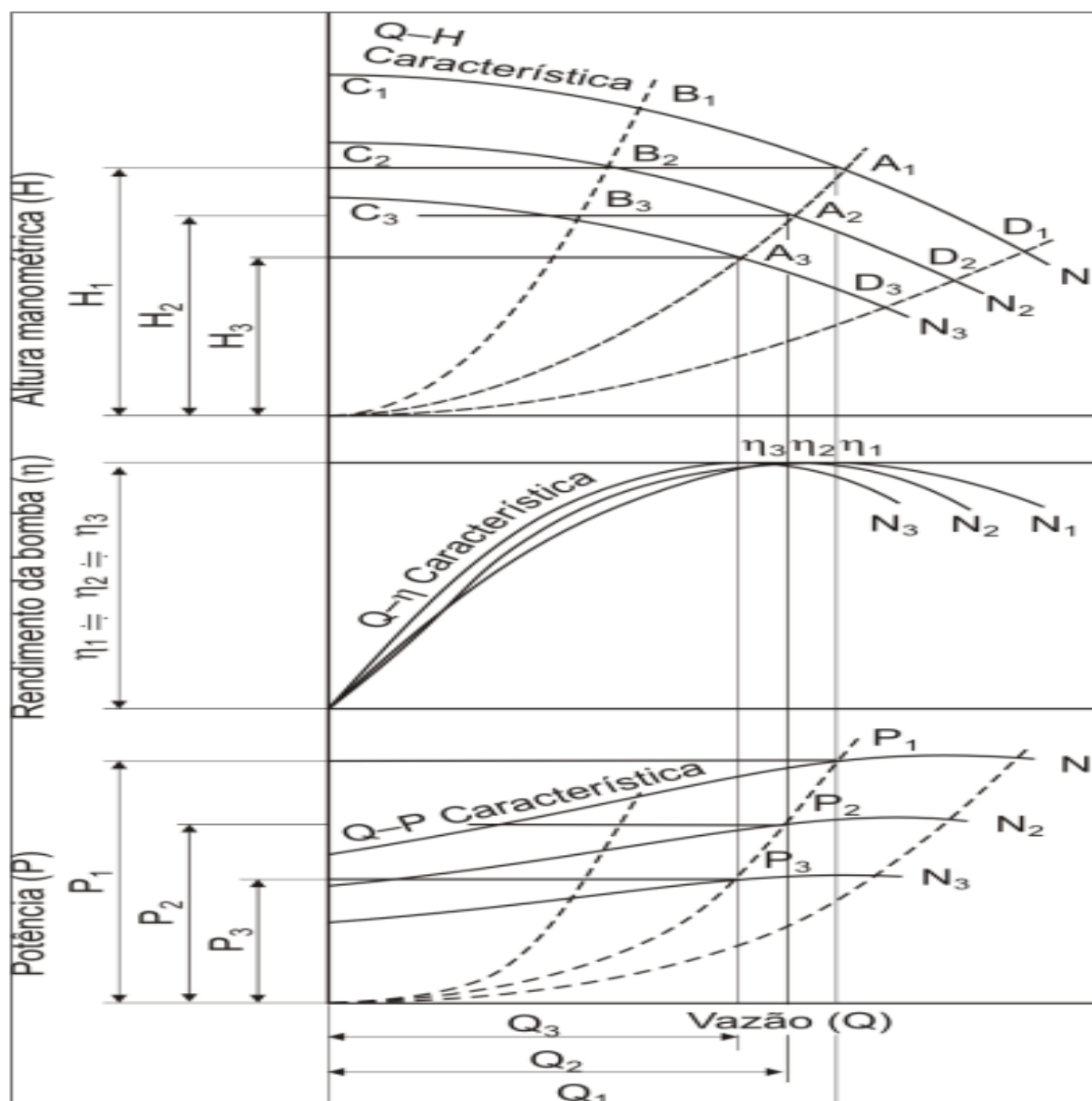


Figura 18 – Curva característica da bomba com a variação da rotação

Fonte: Tsutiya, 2001.

As características apresentadas acima mostram que uma das variáveis mais influenciadas pela variação de rotação da bomba seria a potência, ou seja, havendo uma redução na velocidade do motor, há uma redução considerável na potência requerida pelo equipamento. As demais variáveis como rendimento, vazão e pressão são influenciadas mas não serão abordados nesse estudo.

Diferentes métodos de controle de vazão de água, contemplando as vantagens, desvantagens e principais aplicações foram abordados. Mediante análise dessas informações foi possível inferir que o controle por meio da variação de rotação do motor apresenta as

melhores características para aplicação nesse trabalho, sendo necessário avaliar que equipamentos poderão ser utilizados para variar a rotação dos motores.

3.8 APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA

As bombas alternativas são largamente encontradas em diversos ramos de sistemas de bombeamento devido a: facilidade de instalação, fácil manutenção, compatível com fluido de alta viscosidade, vazão constante. Associados a essas bombas estão os motores elétricos trifásicos, cujo desempenho são influenciados por: dimensionamento incorreto, desequilíbrio, entre fases e oscilação da tensão de alimentação. Os motores elétricos passaram parte dos anos sendo acionados e controlados por sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos. Com o passar dos anos o avanço tecnológico desenvolveu outras alternativas de acionamentos.

O acionamento eletrônico tornou-se uma alternativa atraente, quanto ao seu potencial significativo de conservação de energia, com avanços conseguidos por meio de estudos na área de eletrônica de potência. Nas aplicações industriais algumas necessitam controle de velocidade e de torque nos motores, para isso precisam de recursos que a tecnologia atual pode oferecer com algumas vantagens, sendo o inversor de frequência um desses equipamentos que além de possibilitar controle preciso de torque e rotação, também proporcionam melhor economia de energia e a maior segurança aos equipamentos.

A utilização de inversor de frequência na indústria para controle da rotação dos motores é bastante comum, esse fato se dar devido a viabilidade econômica e a eficiência no controles dos processos, comparando com outros métodos de controle de vazão (TIAGO FILHO, 1996).

Hanson et al. (1996) aplicou o inversor de frequência em alguns sistemas de irrigação com o objetivo de controle vazão, obtendo resultados satisfatórios, uma vez que a redução da potência consumida provocada pelo uso desse equipamento gerou substancial economia de energia; isto permite especular sobre a viabilidade econômica de aplicações semelhantes.

Os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos acoplados aos conjuntos motor-bombas, cuja função é o controle da velocidade de rotação dos motores elétricos de corrente alternada (RODRIGUES; LUVIZOTTO, 2002).

A seguir a ilustração 19, com alguns modelos de inversor de frequência utilizados nas mais diversas aplicações:



Figura 19 – Inversor de Frequência

Fonte: Henrique, 2010.

Segundo Capelli (2001), a função de um inversor de frequência não se limita apenas em controlar a velocidade de um motor, mas também precisa manter o torque constante para que não haja alteração na rotação.

O princípio de funcionamento de um inversor, está no fato de que a velocidade síncrona de um motor é função da frequência da rede de alimentação e do número de polos do motor. Quando há variação na frequência da rede de alimentação, há também a variação na velocidade do mesmo, com valor proporcional (HENRIQUE, 2010).

Uma representação simplificada das principais partes de um inversor de frequência será ilustrado a seguir:

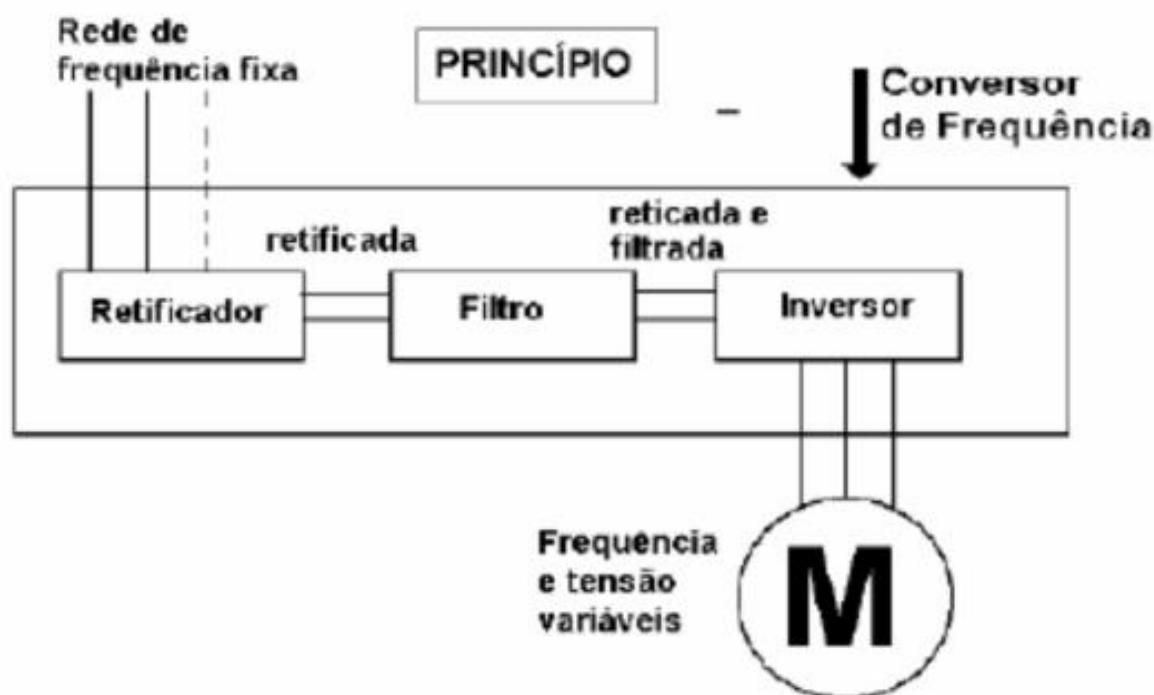


Figura 20 – Representação interna do inversor de frequência

Fonte: Henrique, 2010.

Os inversores de frequência ajustam seus parâmetros de modo a manter o rendimento de um motor na condição nominal de carga ou próximo dela, portanto, o inversor possui grande capacidade de adaptação conforme as solicitações da carga acionada pelo motor.

Em algumas aplicações abordadas nesse trabalho foi identificado que o uso de inversor de frequência como método de controle de vazão trouxe ganhos na eficiência do sistema e redução no consumo de energia. Nesse momento serão esclarecidos a base de cálculos necessária para efetuar a mensuração desses ganhos, ou seja, as equações que relacionam essas variáveis.

Será visto a seguir algumas equações necessárias para o melhor entendimento dessas relações:

a) Potência cedida ao líquido

Uma bomba pode operar a uma velocidade constante e produzir vazões que vão de zero até um valor máximo, dependendo do projeto da mesma. Diversas são as variáveis que dependem da sua capacidade, entre elas a carga total (H), a potência (P) e o rendimento (η). A potência que a máquina entrega ao líquido é diferente da potência consumida por ela. Pode ser definida pela equação (1):

$$P_c = \frac{\gamma Q H}{75 \eta} \quad (1)$$

Onde:

P_c – Potência cedida ao líquido [cv];

γ – Peso específico do líquido [kgf/m³];

Q – Vazão [m³/s];

H – Carga da bomba [m];

η – Rendimento da bomba.

b) Potência elétrica (P_e)

A potência consumida da rede de energia elétrica por uma bomba centrífuga tocada por um motor elétrico de indução trifásico é dada pela equação (2):

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(j) \quad (2)$$

Onde:

P_e – potência elétrica consumida da rede por parte do motor de indução trifásico [W];

V – tensão entre fases [V];

I – corrente [A];

$\cos(j)$ – fator de potência do motor.

c) Equações de Semelhança da Hidráulica

Dentre os fatores que influenciam na curva característica da bomba, temos a variação da vazão e da viscosidade do líquido, entre outros. No entanto, baseado no enfoque do presente trabalho será abordado a variação de rotação da bomba como fator mais importante.

Para a variação de rotação tem-se a variação da vazão (Q), dada pela equação (3), da carga (H), dada pela equação (4) e da potência absorvida, dada pela equação (5).

$$Q = Q_1 \cdot \left(\frac{N}{N_1} \right) \quad (3)$$

$$H = H_1 \cdot \left(\frac{N}{N_1} \right)^2 \quad (4)$$

$$P = P1. \left(\frac{N}{N1} \right)^3 \quad (5)$$

Onde:

Q e Q1 – vazão obtida com a nova rotação e vazão antiga, respectivamente [m³/s];

H e H1 – carga obtida com a nova rotação e carga antiga, respectivamente [m];

N e N1 – nova rotação e rotação antiga [rpm];

P – potência absorvida com a nova rotação[W];

P1 – potência absorvida nas condições iniciais (Q1, H1 e N1).

A maior ocorrência da falta do uso eficiente de um motor de indução é o seu superdimensionamento que ocorre geralmente, pela falta de conhecimento sobre o ciclo de carga e os coeficientes de segurança. Caso o motor trabalhe com baixos índices de carregamento, haverá a diminuição do rendimento a valores insatisfatórios. Sendo assim a economia proporcionada pelo inversor de frequência é dada em função da redução da potência de entrada, do número de horas de funcionamento e do preço da energia elétrica.

3.9 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

Os investimentos fazem parte do patrimônio da organização, sendo assim é importante que a empresa tenha cautela e controle para aplicação desses recursos, para que não ocorram prejuízos e transtornos.

O investimento constitui a troca recursos econômicos certo por algo incerto, é o comprometimento de dinheiro ou outros recursos na expectativa de colher benefícios no futuro (SOUZA, 2003).

Para Souza (2003), existe uma associação direta entre o investimento e o surgimento de uma oportunidade de aplicação, ou percepção de melhoria da empresa, pois após a visualização elabora-se o plano de viabilidade econômica, o planejamento e os insumos necessários para avaliar a possibilidade apresentada.

Segundo Casarotto Filho e Kopittke (2008) as decisões de investimento de um projeto devem considerar:

- a) Critérios econômicos: rentabilidade do investimento;
- b) Critérios financeiros: disponibilidade de recursos;
- c) Critérios imponderáveis: fatores não conversíveis em dinheiro.

Os principais métodos utilizados para analisar alternativas econômicas são (HOJI, 2010):

- a) Método do Valor Presente Líquido (VPL)

Consiste em determinar o valor no instante inicial, descontando o fluxo de caixa líquido de cada período futuro (fluxo de caixa líquido periódico) gerado durante a vida útil do investimento, com a taxa mínima de atratividade, e adicionando o somatório dos valores descontados ao fluxo de caixa líquido do instante inicial.

Como é preciso considerar o valor do dinheiro no tempo, não se pode somar diretamente os fluxos de caixa envolvidos sem antes ajustá-los a uma taxa de desconto, normalmente utiliza-se a taxa mínima de retorno.

Conforme Motta e Calôba (2002), segue equação (6) utilizada para cálculo do VPL:

$$VPL = \frac{FC0}{(1+i)^0} + \frac{FC1}{(1+i)^1} + \dots + \dots \frac{FCn}{(1+i)^n} \quad (6)$$

Onde:

FC0, FC1, FCn: representam os retornos gerados, o valor da entradas do fluxo de caixa;

i: é a taxa mínima de atratividade do investimento.

- b) Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa de desconto que anula o valor atual líquido do projeto de investimento. Este método assume implicitamente que os fluxos de caixa líquidos periódicos são reinvestidos à própria TIR calculada para todo o investimento. O investimento será economicamente atraente se a TIR for maior que a taxa mínima de atratividade. Podendo ser calculada mediante equação (7):

$$Zero = \frac{FC0}{(1+TIR)^0} + \frac{FC1}{(1+TIR)^1} + \dots + \dots \frac{FCn}{(1+TIR)^n} \quad (07)$$

FC0, FC1, FCn: representam os retornos gerados, o valor da entradas do fluxo de caixa;

TIR: taxa interna de retorno.

c) Método do Prazo de Retorno (*Payback*):

O principal método não exato, mede o tempo necessário para que o somatório das parcelas anuais seja igual ao investimento. É um dos métodos de avaliação financeira mais simples, porém é importante ter algumas ressalvas na interpretação desse indicador, pois o mesmo não leva em consideração a vida do investimento. O retorno do investimento pode ser calculado mediante equação (08):

$$Payback = \frac{\text{Valor do investimento}}{\text{Valor do fluxo de caixa}} \quad (08)$$

4 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão abordados os principais métodos utilizados para o desenvolvimento desse estudo, a caracterização da empresa, o enquadramento e classificação dessa pesquisa e o detalhamento das principais etapas realizadas.

Segundo Ganga (2012), uma das maneiras de enquadrar um trabalho acadêmico é por meio da sua abordagem e métodos de pesquisa, classificando-os em 4 (quatro) aspectos, a saber: propósitos da pesquisa, natureza dos resultados, abordagem da pesquisa e procedimentos técnicos. A seguir, serão apresentadas as caracterizações neste trabalho:

a) Propósitos da pesquisa

Este estudo tem propósito avaliativo, uma vez que o objetivo do trabalho é apresentar uma proposta de controle de vazão como alternativa para melhorar o desempenho e a eficiência energética dos geradores de vapor utilizados em campos de petróleo terrestre.

b) Natureza dos resultados

Devido os resultados desse trabalho ter como objetivo verificar o problema de controle de vazão do gerador de vapor, ou seja, um problema pontual e específico desse equipamento, o trabalho é classificado como pesquisa aplicada segundo a natureza dos resultados.

c) Abordagem da pesquisa

O trabalho utiliza alguns métodos, instrumentos e variáveis para coleta de dados quantitativos, contudo esses aspectos apenas garantem certa objetividade a pesquisa qualitativa, ou seja, a pesquisa é predominantemente uma comparação dos ganhos, baseados em entrevistas e observações realizadas durante o trabalho.

d) Procedimentos técnicos

Como esse trabalho procurar analisar o problema no controle de vazão por meio de recirculação de água e a possível substituição por outro método mais eficiente, tomando como base teorias existentes publicadas em documentos acadêmicos, é classificado como pesquisa bibliográfica associada a um estudo de caso empírico, que visa colher evidências para emitir parecer sobre o problema.

O presente trabalho foi realizado num gerador de vapor pertencente a uma empresa do ramo petrolífero localizada na cidade de Mossoró-RN. A figura 21 ilustra o detalhamento das principais etapas desenvolvidas durante a elaboração deste trabalho:

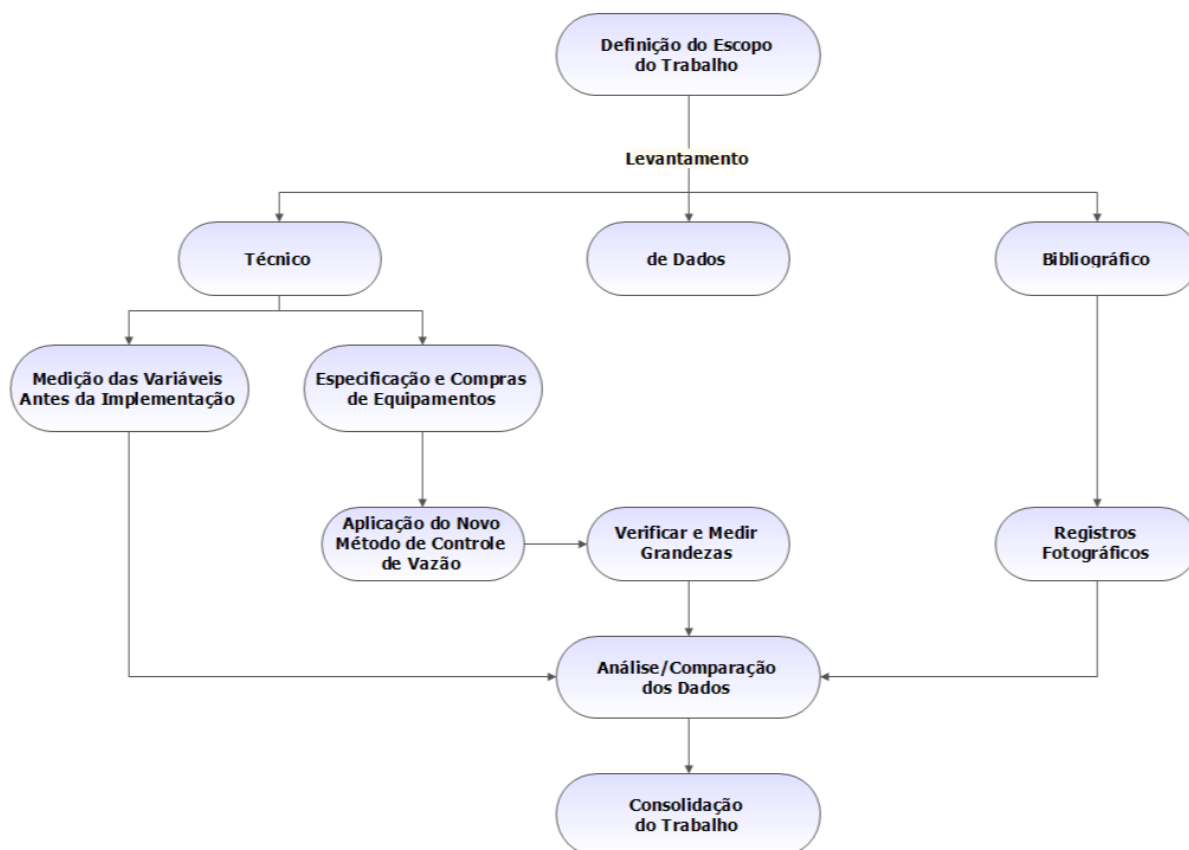


Figura 21 – Representação da metodologia do trabalho

Fonte: Autoria própria.

A elaboração desse trabalho podem ser descritas em associações de algumas etapas que foram realizadas de forma simultânea e/ou possuem semelhanças, conforme descrição a seguir:

a) Definição do escopo do trabalho e levantamento da pesquisa bibliográfica

Nessa etapa foi identificado em qual área seria realizado o trabalho, os equipamentos envolvidos, os problemas a serem abordados, o levantamento de referências bibliográficas sobre o assunto e aplicações de estudo de caso semelhante a esse trabalho.

b) Levantamento das características do sistema de controle

Inicialmente a ação realizada foi o levantamento dos dados do sistema de controle de vazão dos geradores, tais como: vazão, pressão, equipamentos, malhas de controle de vazão, diagramas, manuais. Após esta etapa foram realizados as especificações técnicas dos materiais necessários para a elaboração desse projeto.

Com os dados técnicos dos equipamentos e do processo em mãos foi possível estudar o funcionamento dos geradores identificando possíveis pontos de melhoria dessa máquina.

c) Identificação do problema

Ao estudar a documentação técnica e a de processo, foram estabelecidos possíveis métodos para substituir o controle de vazão atual dos geradores de vapor. Nessa etapa foram considerados aspectos relativos as vantagens e desvantagens de cada método levantados na pesquisa bibliográfica e técnica. A escolha do método alternativo a ser proposto nesse trabalho tomou como base os seguintes pontos: o tempo para implementação, os recursos de material e mão obra disponíveis e os impactos no processo produtivo.

d) Aplicação do método alternativo de controle

A primeira ação realizada nessa etapa foi o planejamento das atividades, tais como: detalhamento dos serviços, negociação da liberação do equipamento, quantificação da mão de obra, material e tempo necessários para o serviço. Posteriormente foram realizadas uma segunda etapa desse planejamento, agora com uma descrição mais minuciosa, entre eles: liberação e emissão de ordem de serviço, reserva de material, cadastramento, aprovação e liberação do serviço no Aplat (sistema de gestão interna de simultaneidade de serviços), solicitação de bloqueio dos equipamentos e preenchimento do termo de entrega do gerador para a manutenção.

Passado a etapa de planejamento, foram iniciadas a etapa de execução, tais como: medição das variáveis antes do serviço, retirada partida compensadora para acionamento do motor, remoção da válvula de recirculação PV - 004, instalação de inversor para acionamento do motor elétrico e controle de vazão, substituição do motor elétrico da bomba d'água, alteração no *ladder* da malha de vazão de água, comissionamento e pré-operação do equipamento.

e) Teste de consistência

Essa etapa foi realizada após o gerador ter sido entregue a operação e funcionando em condições normais. O objetivo nesse momento é levantar dados para subsidiar os estudos que irão verificar se houveram ganhos qualitativos e/ou quantitativos e posterior estudo de viabilidade econômica. Para obtenção desses dados foram realizados registros fotográficos, medição de grandezas elétricas, entre elas: tensão, corrente, fator de potência, potência ativa, reativa e aparente. Para realização desses registros foram utilizados como acessórios: máquina fotográfica e analisador de energia Fluke 45.

f) Análise qualitativa e quantitativa

Essa etapa busca apresentar os ganhos obtidos com as implementações realizadas no gerador de vapor. Após os dados obtidos por meio do teste de consistência foi possível fazer uma análise quantitativa por meio de comparações das grandezas elétricas, realização de cálculo e mensuração dos valores. Outros ganhos foram observados, contudo não possível mensurá-los por algumas limitações desse trabalho, tais como: tempo para medição dos valores, impactos ao processo produtivo, custo, dentre outros. Face as essas limitações, algumas variáveis foram analisadas subjetivamente, ou seja, levando em consideração sua contribuição qualitativa ao processo.

e) Estudo de viabilidade econômica

Essa foi a última etapa a ser realizada, considerando que o objetivo desse trabalho acadêmico é propor uma alternativa de controle de vazão mais eficiente aos geradores de vapor, a princípio não se tem o referencial financeiro como requisito para elaboração dessa pesquisa, ou seja, os objetivos desse trabalho estarão alcançados quando um método alternativo de controle de vazão estiver formulado, testado e aprovado, não tendo correlação com a parte econômica.

Contudo a análise financeira do projeto busca dá um retorno a empresa na qual o trabalho foi desenvolvido, já que foram utilizados os seus recursos para realização dessa pesquisa, seria importante mostrar os resultados numa linguagem econômica, mais acessível aos gestores da empresa, o que poderá auxiliar na tomada de decisões, tais como: aplicar da esta pesquisa aos demais equipamentos, buscar novos métodos de controle, contratação de empresa especializada na área, identificar novas oportunidades de melhoria, dentre outras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão abordados os aspectos técnicos dos geradores de vapor, discussão dos dados mensurados antes e após a instalação de inversor de frequência como método de controle de vazão, mostrar os resultados com ganhos quantitativos e qualitativos e apresentar estudo de viabilidade econômica da implantação.

5.1 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE CONTROLE

Os geradores de vapor possuem diversas sistemas de controle automáticos que são implementadas através do CLP, conforme destacado anteriormente nesse trabalho. Essas malhas são responsáveis por todo o sistema de controle dos geradores, fazem o monitoramento e a correção das variáveis conforme *setpoint* estabelecido pelo operador. Em particular será destacado a malha de água que é responsável em relacionar a quantidade de água na entrada e o vapor na saída do GV, ou seja, o operador estabelece uma vazão de referência e o CLP por meio da malha de água irá corrigir e monitorar as outras variáveis que interagem com a mesma para que o vapor possa ser gerado na quantidade e qualidade especificada. Esse processo não é tão simples, pois as malhas devem interagir uma vez que as variáveis estão relacionadas, e também dependem da atuação de alguns equipamentos presente nos geradores.

Dentre os diversos equipamentos presentes no gerador de vapor, para este estudo, serão abordados apenas o motor elétrico e a bomba alternativa (figura 22) que são atuadores da malha de controle de água e são os mais representativos nessa máquina, pela capacidade e carga instalada.

A seguir será ilustrado um conjunto moto-bomba (MB) nos geradores de vapor:



Figura 22 – Conjunto motor elétrico e bomba d'água

Fonte: Autoria própria.

A bomba mostrada na figura 22 é do tipo alternativa com cinco estágios, fornecendo energia necessária para o percurso da água no processo, cuja pressão na sucção varia entre 4 kgf/cm² a 20 kgf/cm² e na descarga entre 50 kgf/cm² a 120 kgf/cm².

Na configuração original essas bombas estão acopladas a um motor elétrico de indução trifásico com potência normalmente de 200 CV, com acionamento por meio de partida compensadora.

O valor da vazão de água em m³/h é um dos parâmetros especificados pelo operador antes de iniciar o processo de injeção de vapor. A válvula de controle PV-004 (figura 23) efetua a recirculação de água, ajustando a vazão medida à vazão especificada pelo operador, ou seja, como a bomba possui capacidade bastante superior a vazão de trabalho, a válvula desvia o fluxo da descarga para a sucção para regular a vazão desejada. Segue abaixo representação desse sistema de controle, mostrando a atuação da válvula de recirculação:



Figura 23 – Válvula de recirculação PV – 004.

Fonte: Autoria própria.

Além da válvula de controle PV – 004 existe uma válvula manual que funciona como *by – pass* desta, tudo isso para auxiliar o processo de partida do gerador que apresenta alto grau de complexidade e dificuldade de controle para os operadores.

5.2 ANÁLISE DO CONTROLE DOS GERADORES

As características de injeção de vapor são particular de cada formação (reservatório) e requer diferentes regulagens de pressão e vazão. Devido a esses detalhes, o dimensionamento dos geradores ocorreram da seguinte maneira: atender a maior demanda de pressão e vazão e quando necessitar de valores menores recircular água por meio de válvula específica.

O problema dessa concepção de projeto é o desperdício causado quando o gerador não está trabalhando em sua capacidade máxima, fato este que ocorre diariamente e intermitente.

O desafio deste trabalho é possibilitar um controle de vazão que seja flexível independente da capacidade em que o gerador esteja trabalhando. Ou seja, um controle de vazão que proporcione a quantidade de água exata necessária ao processo sem ter que recircular, de forma totalmente automática e mantendo a segurança operacional do equipamento.

Outros problemas encontrados nos geradores são decorrentes da utilização de partida compensadora para acionamento dos motores elétricos e do uso de válvula recirculação de água, tais problemas impactam diretamente nos indicadores da manutenção, dentre eles: disponibilidade, confiabilidade, perda de produção e custos.

A descrição dos principais problemas e/ou dificuldades identificados devido a utilização desse método de acionamento e controle nos geradores de vapor:

a) Chave partida compensadora

- Limitação do número de partidas consecutivas;
- Custo elevado devido ao autotransformador;
- Ocupa um grande volume no CCM;
- Maior complexidade na identificação de falhas;
- Corrente bastante elevada durante partida;
- Proteções limitadas;
- Não oferece controle rotação e/ou tensão.

b) Válvula de recirculação PV - 004

- Desgaste prematuro nos internos da válvula e bomba d'água;
- Alto nível de ruído e vibração;
- Desperdício de energia;
- Grande complexidade operacional durante a partida.

5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO ALTERNATIVO DE CONTROLE

A eficiência energética e economia de energia são assuntos amplamente discutidos no âmbito da indústria, facilmente são encontrados esses termos quando se discute questões sobre otimização de recursos e eficiência de processos operacionais. Nessas oportunidades uma das principais recomendações encontradas abordam a necessidade de adequação das instalações e equipamentos e otimização dos sistemas, tais como: adequar demanda elétrica, rever utilização de motores superdimensionados, correção de fator de potência, eliminação desperdícios por meio de recirculação de fluídos, substituição de equipamentos obsoletos, dentre outros.

Neste trabalho foram identificados duas ações, a serem implantadas, com grande potencial de ganhos energéticos e operacionais, são eles: substituição do método de partida compensadora por inversor de frequência e adequação do motor elétrico da bomba d'água.

a) Instalação de inversor de frequência (VSD)

O uso de inversor de frequência permite a programação de uma rampa de aceleração para suavizar a partida do motor. Fato este, que minimiza o afundamento de tensão no sistema durante a partida do motor provocado pela intensidade de corrente nesse período, reduz também os efeitos danosos dessa corrente sobre a vida útil do motor e da bomba.

Dentre diversas aplicações, destaca-se neste trabalho a utilização do inversor para controle da rotação do motor, vislumbrando grandes oportunidades de ganhos. Por meio dessa aplicação é possível realizar um controle fino de vazão nos geradores, possibilitando a eliminação da válvula de recirculação da PV – 004. Dessa maneira quando há necessidade de ajuste na vazão, o inversor de frequência incrementa/decrementa a rotação do motor. O controle passou a atuar de forma mais estável e confiável, independe da quantidade de vapor que está sendo injetado. Essas vantagens proporcionaram ganhos de segurança, econômicos e eficiência.

b) Adequação do motor elétrico da bomba d'água

Face aos fatores já mencionados anteriormente neste trabalho, os equipamentos dos geradores de vapor são superdimensionados, não diferente, o motor da bomba d'água necessita ser readequado, uma vez que a sua capacidade está muito acima da necessidade operacional dos geradores, essa alteração foi possível devido o VSD possuir controle de torque do motor.

Segue tabela com sugestão da readequação dos motores elétricos da bomba d'água nos geradores de vapor:

Tabela 01 – Motores elétricos adequados da bomba d'água.

Motor elétrico da bomba d'água	
Atual (CV)	Recomendado (CV)
100	75
200	100

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

Conforme análise da tabela 01, é possível identificar uma redução considerável na potência dos motores, para o gerador de vapor estudado nesse trabalho houve redução de 200 para 100 CV.

5.4 TESTE DE CONSISTÊNCIA

Nesse tópico serão abordados os efeitos das ações tomadas e a quantificação dos resultados obtidos. Para isso foi realizado medições de algumas variáveis no gerador de vapor antes e depois da instalação do inversor de frequência e da substituição do motor elétrico, ambas procurando manter semelhantes as principais condições operacionais do equipamento, tais como: pressão, vazão e temperatura.

Afim de colher os dados necessários para comparação dos resultados da instalação de inversor de frequência para controle de vazão e a adequação do motor elétrico da bomba d'água nos geradores de vapor, foi utilizado um analisador de energia Fluke 435 para realizar medições das grandezas elétricas no motor.

A seguir será ilustrado analisador de energia Fluke 435 utilizado neste trabalho:



Figura 24 – Analisador de energia Fluke 435.

Fonte: Autoria própria.

O analisador de energia é um instrumento para medição de grandezas elétricas, para que os registros possam ser realizados ele deve ser conectado ao circuito elétrico no qual deseja ser analisado, possui grande variedades na medição das grandezas, dentre elas: tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, escorregamento de fase, dentre outros. Essas grandezas são armazenadas de forma contínua, possibilitando ao equipamento a plotagem de gráficos de todas as grandezas.

Inicialmente os principais dados de processos do gerador foram medidos para que após a realização das mudanças as medições futuras tenham como base esse mesmo critério, afim de que os resultados obtidos tenham confiabilidade e a credibilidade a um estudo acadêmico.

Os dados técnicos e operacionais verificados antes das implementações serão mencionados a seguir:

Quadro 04 – Dados operacionais do GV antes das implementações

Dados Operacionais sem VSD	
Capacidade	50 MM BTU/H
Vazão água	8,5 m ³
Pressão	96,0 kgf/cm ²
Motor	200 CV
Acionamento motor	Partida compensadora
Bomba	National Oilwell-2170 4M
Controle vazão	Recirculação PV – 004

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

Tabela 02 – Medições no GV antes das implementações

Medições sem VSD	
Potência ativa	67,0 kW
Potência aparente	80,0 kVA
Potência reativa	43,0 kVAr
Fator de potência	0,82
I _A ; I _B ; I _C	101; 99; 97 (A)
V _{AB} ; V _{BC} ; V _{CA}	466; 467; 467 (V)
Frequência do motor	60 HZ

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

Ao instalar o inversor de frequência e a substituição dos motores, foram realizados medições semelhantes as anteriores, afim de levantar os dados para análises dos resultados. Abaixo segue esses dados operacionais e técnicos realizados nos geradores de vapor:

Quadro 05 – Dados operacionais do GV após implementações.

Dados Operacionais com VSD	
Capacidade	50 MM BTU/H
Vazão água	8,5 m ³
Pressão	96,5 kgf/cm ²
Motor	100 CV
Acionamento motor	Inversor de frequência
Bomba	National Oilwell-2170 4M
Controle vazão	Variação da rotação do motor

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

Tabela 03 – Medições no GV após implementações

Medições com VSD	
Potência ativa	27,0 kW
Potência aparente	29,0 kVA
Potência reativa	10,5 kVAr
Fator de potência	0,82
$I_A; I_B; I_C$	47; 45; 47 (A)
$V_{AB}; V_{BC}; V_{CA}$	475; 474; 474 (V)
Frequência do motor	32 Hz

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

Nesse tópico foram realizados algumas medições para que possa ter consistência na análise dos dados, de posse dessas informações é possível fazer comparações e analisar os ganhos operacionais, financeiros e de segurança.

5.5 ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA

Será enfatizado nesse momento os resultados de forma quantitativa e qualitativa, principalmente a sua representatividade em aspectos financeiros e ganhos operacionais ao processo de injeção de vapor utilizando geradores.

5.5.1 Convenções para base de cálculos

Tomando como base os dados obtidos no teste de consistência, nesse momento serão realizadas algumas considerações necessárias para realização dos cálculos e posteriormente apresentação dos ganhos econômicos e análise de viabilidade financeira. Conforme descrito posteriormente:

a) Tempo médio anual

Os geradores de vapor funcionam em regime interruptos, para efeito de cálculos serão considerados 24 h/dia num total de 8760 horas anuais de operação.

b) Tarifa da energia elétrica (R\$/MWh)

Nesse trabalho será considerado o valor de 208,01 R\$/MWh, tarifa prevista em contrato com a concessionária de energia elétrica.

c) Consumo de energia ativa (MWh)

Para realização do cálculo do consumo de energia ativa será utilizado a seguinte equação: $P_{ativa} \text{ (MW)} \times \text{tempo (hs)}$. Todos os valores serão anuais para melhor análise dos dados.

d) Custo com energia ativa

O custo será avaliado anualmente, sendo realizado pela seguinte equação: Consumo (MWh) x Tarifa (R\$/MWh);

e) Avaliação dos resultados

Os resultados serão avaliados por meio de valores absolutos e relativos, conforme equações:

- Absolutos: $|\text{valor}_{final} - \text{valor}_{inicial}|$;

- Relativo: $|\text{valor}_{final} - \text{valor}_{inicial}| / \text{valor}_{inicial}$.

5.5.2 Ganhos quantitativos

Com os dados obtidos no teste de consistência, realizado as considerações necessárias e os cálculos, enfim, é possível apresentar os resultados e realizar uma análise de todas as variáveis após as implantações propostas neste trabalho.

Para melhor análise serão apresentados os dados de forma compilada em apenas um quadro, contemplando todas as grandezas e valores mais relevantes mostrados neste estudo de caso, conforme abaixo:

Quadro 06 – Comparativo dos dados e ganhos

Parâmetros/equipamentos	GV sem VSD	GV com VSD	Ganhos	
			Absoluto	Relativo
Vazão de água (m³/h)	8,5	8,5		
Pressão (kgf/cm²)	96,0	96,5		
Corrente no Motor (A)	99	47	52	52,53 %
Tensão no Motor (V)	466	474	-	-
Fator de Potência	0,82	0,78	-	-
Potência Ativa (kW)	67	27	40	59,70 %
Potência Aparente (kVA)	80	29	51	63,75 %
Potência Reativa (kVAr)	43	10,5	32,5	75,58 %
Tempo médio anual (hs)	8760	8760	-	-
Consumo energia ativa (MWh)	586,92	236,52	350,4	59,70 %
Tarifa energia (R\$/MWh)	208,01	208,01	-	-
Custo da energia ativa (R\$)	122.085,23	49.198,53	72.886,70	59,70 %

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

Mediante análise dos dados acima, é possível quantificar os ganhos quantitativos em virtude da utilização de inversor de frequência e da substituição dos motores. Tomando como base os dados acima, tem-se os seguintes resultados são apresentados:

- Redução no consumo de energia elétrica em aproximadamente 60 %, melhorando a eficiência do processo;
- Economia financeira de R\$ 72.886,70 ao ano por unidade de gerador de vapor;
- Redução no consumo de energia reativa de 75,58%.

5.5.3 Ganhos qualitativos

A aplicação das propostas sugeridas nesse trabalho trouxeram ganhos quantitativos consideráveis, como já foi visto no tópico anterior, mas os ganhos obtidos não se resumem

apenas a valores mensuráveis. É possível listar alguns benefícios obtidos que não podem ser expressos numericamente, ou não foram devido a limitações desse trabalho: restrição de tempo, equipamentos, custos e impactos no processo produtivo.

Face a essas limitações, segue abaixo os ganhos qualitativos obtidos com as aplicações realizadas nesse trabalho:

- a) Aumento do MTBF nos equipamentos da malha de controle de água;
- b) Redução dos custos totais com manutenção;
- c) Redução dos custos operacionais;
- d) Redução dos riscos operacionais durante *start-up* do sistema;
- e) Diminuição dos níveis de ruído nas instalações beneficiando funcionários e fauna local;
- f) Dispositivo de partida suave: minimiza inconvenientes surtos de pressão;
- g) Eliminação de paradas em outros geradores de vapor devido surto de vazão e pressão;
- h) Variação de vazão sem geração de perda de carga;
- i) Redução do desgaste dos componentes de controle e atuação;
- j) Redução no desgaste no componentes internos da bomba;
- k) Maior flexibilidade no controle;
- l) Melhor proteção do painel elétrico;
- m) Aumento na vida útil do motor;
- n) Redução do pico de corrente na partida;

5.6 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Diante dos resultados apresentados nos ganhos quantitativos e qualitativos, fica comprovado que a instalação de inversor de frequência e a adequação do motor elétrico da bomba d'água trazem ganhos consideráveis. Contudo nessa análise não estão contemplados os investimentos e o aporte financeiro necessário a implantação dessas melhorias.

Nesse tópico serão contabilizados os principais recursos necessários para realização do serviço: mão de obra, material e equipamentos. O objetivo avaliar a viabilidade econômica e o tempo de retorno do investimento realizado. Essas informações são essenciais para o mercado capitalista, pois gestor da organização saber a que preço serão obtidos esses ganhos é muito importante para conseguir convencer a empresa a investir nessas melhorias.

Na tabela 04 serão enfatizados os dados com os custos e a descrição dos valores referentes a mão de obra, materiais e equipamentos:

Tabela 04 – Levantamento dos custos

Quantidade	Descrição	Custo Estimado (R\$)
01 Un.	Conversor frequência 3F 5Hz – 120Hz	34.000,00
100 m	Cabo unipolar PP 1x70 mm ²	1.350,00
150 m	Cabo de automação 2x1,5mm ²	562,50
20 m	Eletroduto rígido 2"	1.666,66
30 h	Serviço especializado de eletricista	2.152,50
30 h	Serviço especializado de instrumentista	2.152,50
Custo Total (R\$)		41.884,16

Fonte: Pesquisa de campo (2013)

Analisando a tabela 04 verifica-se que foi necessário aproximadamente a quantia de R\$ 41.884,14 referente aos custos de implantação dessas alterações, por outro lado houve tem-se que a economia após as implementações foi de R\$ 72.886,70. Sabendo desses dados é possível encontrar o tempo de retorno do investimento, conforme abaixo:

$$\text{Tempo}_{\text{Retorno}} = 41.884,14 / 72.886,70 \text{ a.a.} = 0,575 \text{ anos.}$$

Os cálculos mostram que em aproximadamente 7 (sete) meses após ter sido realizado a instalação do VSD e adequação do motor elétrico, os ganhos obtidos serão suficiente para custear as despesas necessárias para tal.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que a utilização de inversor de frequência como controle de vazão nos geradores de vapor, aliado a adequação do motor elétrico da bomba d'água proporcionam: melhoria na eficiência do processo em cerca de 60%, economia de energia, redução nos desgastes dos equipamentos, economia financeira de 72.886,70 ao ano por gerador. Os números apresentados mostram que é possível obter ganhos energéticos e econômicos consideráveis nas aplicações com inversores de frequência.

Quanto aos objetivos, é de suma importância ressaltar que foram alcançados plenamente, a começar porque a implantação do VSD cumpre perfeitamente sua função mediante análise técnica e econômica. Além disso, durante o trabalho pontos imprescindíveis da bibliografia foram discutidos, possibilitando um aprendizado teórico acerca da disciplina de eletricidade, tanto de forma geral, quanto nas áreas de automação e manutenção, bem como em áreas específicas do conhecimento: sistemas de acionamentos de motores, tipos de controle de vazão, aplicações com inversor de frequência, relação entre grandezas físicas e medição das variáveis do motor, dentre outros.

Nesse ponto, muito se aprendeu a respeito de inversor de frequência, sua programação, os parâmetros de controle, funcionamento, comportamento da tensão, forma de onda na saída para o motor, características do relacionamento da frequência com a tensão, rotação, corrente e potência. É razoável dizer que aplicação proposta nesse trabalho, não constitui ou abrange o universo de possibilidades desse equipamento, o mesmo possui grandes recursos tecnológicos e larga diversidade de aplicações.

Noutra perspectiva, os resultados econômicos validaram o sucesso deste projeto, com previsão de retorno do investimento em aproximadamente 7 meses. Recomenda-se a empresa na qual foi realizado esse trabalho, que implemente as sugestões aqui propostas nos outros 8 (oito) geradores de vapor pertencentes a mesma. Essa medida traz uma projeção financeira de 655.980, 30 R\$ de economia ao ano.

Por fim, nada impede que o presente trabalho, por se tratar de uma aplicação inicial, seja retomado e aperfeiçoado, até porque outras formas de controle de vazão podem trazer ganhos ainda mais consideráveis. No entanto, o mais importante é que a visão de melhoria, de evitar desperdícios e a busca pela melhor eficiência nos sistemas, sejam um legado deixado por esse trabalho.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G.A. **Manual de hidráulica**. 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1991. 335 p. Disponível em <<http://www.filecrop.com/Manual%20de%20Hidraulica%20Azevedo%20Neto%208%C2%AA%20edi%C3%A7%C3%A3o.html>> Acesso em: 01.11.2013.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: UFV, 1989. 596p.

CAMPOS, Leticia de Oliveira. **Injeção de Vapor e Solvente em Reservatório do Nordeste Brasileiro (2013)**. Disponível em: <<http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0CFEQFjAF&url=http%3A%2F%2Fwww.sigaa.ufrr.br%2Fsigaa%2FverProducao%3FidProducao%3D1563433%26key%3D84cb776968f5ae78ae1756313f6abb3b&ei=MJwQU7y2IonQkQePzICoBw&usq=AFQjCNFYUgR6qC4q2l9CmcrN7SuF1Pt9UA&sig2=MuDxMPOECwOEclkoTc0CWg&bvm=bv.61965928,d.dmQ>> Acesso em: 01.11.2013.

Capelli, A. **Inversores de Frequência Vetorial**. Revista Saber Eletrônica nº 337, Fevereiro de 2001. Disponível em <http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/Inversores.pdf>. Acesso em: 01.11.2013.

CASAROTTO FILHO, Nelson C.; KOPITTKE, Bruno H. **Análise de Investimentos**. 10 ed. São Paulo: Atlas, 2008

CONZETT, J.C.; ROBECHKE, J.R. **Acionamentos de velocidade variável aplicados a bombas centrífugas**. São Paulo: Reliance Electric Co, 1983. 8 p.

GALVÃO, Edney Rafael V. P. **Injeção de vapor e solvente como um método de recuperação avançada em reservatórios de óleo pesado (2008)**. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo), Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GANGA, Gilberto Miller Devós. **Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) na engenharia de produção: um guia prático de conteúdo e forma**. São Paulo: Atlas, 2012.

HANSON, B.; WEIGAND, C.; ORLOFF, S. **Variable-frequency drives for electric irrigation pumping plants save energy**. Disponível em: <<http://ucce.ucdavis.edu/files/repositoryfiles/ca5001p36-69744.pdf>> Acesso em: 01.11.2013.

HENRIQUE, Hélio. **Chaves de Partidas para Motores Trifásicos de Indução (2010)**. Disponível em: < <http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos-ii/chaves-de-partida> > Acesso em: 01.11.2013.

HOJI, Masakazu. **Administração financeira e orçamentária: matemática financeira aplicada, estratégias financeiras, orçamento empresarial**. 9.ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MOTTA, Regis R; CALÔBA, Guilherme M. **Análise de Investimentos**. São Paulo: Atlas, 2002.

NOBRE, Valério; MELO, Walmy. **Sistemas de Controle e Segurança dos Geradores de Vapor**. Petrobras/ATP-ARG. In: Curso de Geração e Injeção de Vapor, 6º ed., 2011.

QUEIROZ, Gertrudes Oliveira de; et. al. **Influência da cota de vapor no processo de injeção cíclica de vapor**. Anais: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2005.

RODRIGUES, Marcos Allyson Felipe. **Estudo paramétrico da segregação gravitacional na injeção contínua de vapor**. 2008. 160f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo), Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

RODRIGUES, Wlamir; LUVIZOTTO JÚNIOR, Edevar. **Inversor de Frequência em Sistema de Bombeamento (2002)**. Disponível em: <<http://www.saneamentobasico.com.br/portal/wp-content/uploads/2013/02/INVERSOR-SISTEMAS-BOMBEAMENTO.pdf>> Acesso em: 15.10.2013.

ROSA, Adalberto José, et. al. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. Rio de Janeiro, Interciência: PETROBRAS, 2006, 832p.

SANTANA, Keila Regina. **Estudo da segregação gravitacional no processo de injeção de vapor em reservatórios heterogêneos**. 2009. 136f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo), Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SANTOS, Pedro Érico Sousa e; et. al. **Métodos de recuperação secundária convencionais**. Cadernos de Graduação, Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 12, n. 12, 2010.

SOUZA, Acilon B. **Projetos de Investimento de Capital: Elaboração, Análise e Tomada de Decisão**. São Paulo: Atlas, 2003.

SOUZA JÚNIOR, José Cleodon de. **Geradores de Vapor**. Petrobras/ATP-ARG. In: Curso de Geração e Injeção de Vapor, 5º ed., 2010.

THOMAS, JOSÉ EDUARDO. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2001. 2ª edição. Interciência: PETROBRAS, 2004, 271p.

TIAGO FILHO, G. L. **Uso de bombas com rotação variável**. Itajubá: EFEI. 1996. 19 p.

Tsutiya, M. T., **Utilização de Inversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia Elétrica em Sistema de Bombeamento (2001)**. Disponível em:
<<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/conferencia/VI%20serea%20palestra/p05.pdf>> Acesso em: 15.10.2013.