

UTILIZANDO TEORIA DE FILAS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM CENTRO DE MANUTENÇÃO DE UMA PETROQUÍMICA BRASILEIRA

Amaury Bordallo Cruz (UGF)
Cláudia Pinto de Carvalho (UGF)
José Haim Benzecry (UGF)
Marco Antonio R. de Almeida (UGF/COPPE)
Mauro Rezende Filho (UGF/COPPE)
Suzane Cardoso M. da Silva (UGF)

Resumo

Uma refinaria é composta por uma grande estrutura operacional, no qual está disposta uma série de equipamentos, estes responsáveis pela realização dos processos de separação, conversão, tratamento e auxiliares, tais como, as bombas centrífugas. Sem a sua utilização todo o processo de refino seria paralisado. Desta forma a mesma vem a ser um equipamento importante em toda a linha produtiva e sua paralisação proporciona grandes prejuízos financeiros. Assim, baseado neste problema apresenta-se a teoria das filas como um dos principais instrumentos para tomada de decisão gerencial e para o planejamento de um centro de manutenção de bombas centrífugas, segundo a engenharia de confiabilidade. Ao final do trabalho são apresentados os resultados, que se demonstraram satisfatórios e portanto, dando o suporte necessário para a gerência de engenharia de manutenção da refinaria.

Palavras-Chaves: Teoria de filas, manutenção centrada em confiabilidade, bombas centrífugas.

Abstract

The refinery consists of a large operating structure, which are arranged a series of equipment, those responsible for conducting the processes of separation, conversion, treatment and ancillary services, such as centrifugal pumps. Without its use all the refining process would be stopped. Thus, it becomes an important equipment throughout the production line and its failure provides great financial losses. So based on this problem presents the queuing theory as an important tool for decision making and maintenance center planning of centrifugal pumps, according to reliability engineering. At the end of the paper are presents the results, which showed satisfactory and thus giving the necessary support for the management of the refinery maintenance engineering.

Keywords: *Queueing theory, reliability centered maintenance, centrifugal pumps.*

1. Introdução

O petróleo sendo uma complexa mistura de hidrocarbonetos necessita do refino que consiste no conjunto de beneficiamentos, pelos quais o petróleo bruto passa, visando à obtenção de seus derivados. O objetivo de uma refinaria de petróleo é transformar o petróleo em produto que possa ser vendido. Portanto, uma refinaria é um complexo sistema de equipamentos onde necessita de estratégias de confiabilidade para que seus equipamentos não sofram demasiadas manutenções corretivas conforme sua utilização. Em geral, sua estrutura é composta pelo setor operacional que abrange os processos de refino, um local administrativo, um local de expedição e chegada de materiais e as oficinas de equipamentos dinâmicos (bombas e compressores), equipamentos estáticos, elétrica e instrumentação. Em uma refinaria existe uma gama de equipamentos e mão-de-obra de manutenção limitada. Quando os equipamentos estão em manutenção ocorre parada da unidade, acarretando em perda financeira. Logo, o ideal é sempre evitar ou prever as falhas dos equipamentos através de manutenção preventiva e preditiva. Porém, há circunstâncias em que diversos equipamentos que falham chegam ao mesmo tempo na oficina e com isto, gera-se fila de equipamentos aguardando manutenção. Para que isto não aconteça, é necessário o estudo do comportamento do centro de manutenção para analisar a qualidade do seu serviço operacional e assim, evitar possíveis prejuízos financeiros ao empreendimento. Portanto, é necessário o estudo dos indicadores de desempenho baseado em teoria de filas para o entendimento da fila dos equipamentos que falham. Após a análise dos indicadores, a equipe de manutenção deve garantir a confiabilidade dos equipamentos no tempo certo e ao menor custo possível (FREITAS FILHO, 2008).

2. Gestão da Manutenção

O nome manutenção foi utilizado pela primeira vez no século XVI na Europa Central e tomou força na Revolução Industrial e principalmente na Segunda Guerra Mundial. Com a intensa concorrência e os pequenos prazos de entrega, as máquinas tiveram que obter uma gestão para que não quebrassem e parassem a produção. Assim, ocorre nas refinarias manutenção com foco no planejamento.

Conforme ANDRADE (2002), manutenção é atuar no sistema com o objetivo de evitar quebras e/ou paradas na produção, bem como garantir a qualidade planejada dos produtos. Em seu trabalho BONIFÁCIO (2005) faz uma ressalva sobre o modelo de gestão de manutenção adotado no Brasil, onde o mesmo afirma que as práticas aqui adotadas, são as mesmas empregadas nos países mais industrializados do mundo, de forma que a tecnologia da manutenção utilizada no país se encontra a nível internacional, porém existem ainda paradigmas a serem quebrados, pois não é mais aceitável que o equipamento ou sistema pare de maneira não prevista. Assim sendo, a manutenção industrial deve estar baseada em um paradigma moderno, no qual “O homem de manutenção sente-se bem quando ele consegue evitar todas as falhas não previstas”.

SOUZA (2008) afirma que a saúde física e financeira da maioria das organizações, possui uma grande dependência sobre a integridade continuada, física e funcional de seus ativos, sendo esta, portanto, uma das mais relevantes características da atividade econômica do final do século XX e início do século XXI.

BONIFÁCIO (2005) apresenta em seu estudo, conforme tabela 1, uma pequena visão da participação da manutenção sobre os investimentos para a empresa.

Tabela 1 – Participação do Custo Total da Manutenção sobre o Faturamento Bruto Geral

| Ano | Participação |
|------|--------------|
| 2003 | 4,27 % |
| 2001 | 4,47 % |
| 1999 | 3,56 % |
| 1997 | 4,39 % |
| 1995 | 4,26 % |

Fonte: ABRAMAN (2004) *apud* BONIFÁCIO (2005).

2.1. Técnicas Modernas de Manutenção

Atualmente no campo da manutenção industrial brasileira existem práticas que vão desde a corretiva, ou seja, “Quebra - Conserta”, chegando até as técnicas pró-ativas, as quais se baseiam no emprego de tecnologias e processos avançados, para realização da prevenção. Nesse contexto, destacam-se empresas dos setores de papel e celulose, petroquímico, aviação e siderúrgico como impulsionadores da utilização de técnicas de ponta em engenharia de confiabilidade. Os avanços obtidos em determinados segmentos provêm das condições de mercado que exigem maior competitividade e, conseqüentemente, maior disponibilidade operacional a um menor custo, de acordo com ABRAMAN (2004).

Conforme exposto por VIANA (2002), os tipos de manutenção consistem nas formas como são encaminhadas as intervenções nos instrumentos de produção, ou seja, nos equipamentos que compõem uma determinada planta. Neste sentido observamos que existe um consenso, salvo algumas variações irrelevantes, quanto aos tipos de manutenção.

PINTO e XAVIER (1999) apresentam abaixo, as classificações para os principais tipos de manutenção sendo excluída desta classificação, a manutenção detectiva, por entender que se trata apenas de uma técnica utilizada para realizar a manutenção preditiva:

- Manutenção Corretiva
- Manutenção Preventiva
- Manutenção Preditiva
- Manutenção Pró-Ativa

De acordo com a NBR 5462 (1994), a Manutenção Corretiva trata da manutenção efetuada após a ocorrência de uma falha, destinada a colocar um item de volta as condições de executar sua função requerida no menor espaço de tempo e custo possível. É basicamente a atuação para correção da falha. A Corretiva é uma manutenção não planejada, pois os operadores não sabem quando a falha irá ocorrer, acontecendo repentinamente. É a técnica mais primitiva, pois é impossível excluir todas as falhas existentes. A Manutenção Preventiva trata da manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. É uma forma de evitar ou reduzir a manutenção corretiva. É a fase inicial de uma manutenção planejada, com reparos programados, assegurando funcionalidade da máquina por um determinado tempo. A Manutenção Preditiva consiste em garantir qualidade de serviço com técnicas de análise, utilizando meios de monitoração para reduzir a manutenção corretiva e preventiva. É baseada no conhecimento dos desgastes das peças vitais do

equipamento, no caso de uma bomba centrífuga temos mancais e rolamentos. Exemplificando técnicas desta manutenção: análise de vibração, ultrassom, etc. Manutenção Pró-ativa é tida como meio importante para sanar as causas básicas da falha raiz e aumentar a vida útil do equipamento.

Diversas técnicas e estratégias de manutenção foram criadas pelas organizações focando o ganho de eficiência pela função manutenção estando nesta concepção incluso o MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade), TPM (Manutenção Produtiva Total), RBM (Manutenção Baseada no Risco).

Estes sistemas buscam elucidar um método para a gestão da manutenção produtiva da organização, adotando uma postura pró-ativa, de modo que a função manutenção adquira um caráter preventivo e não corretivo. Com isto, espera-se resolver o problema antes que ele ocorra e prejudique as operações da produção. Dentre os apresentados, o TPM tem adquirido grande aceitação nas empresas brasileiras devido aos seus resultados, estes comprovados por empresas que o implantaram, porém os que melhores se enquadram no contexto deste estudo vem a ser a MCC e a RBM. Como este trabalho tem foco na confiabilidade será abordado a seguir somente o MCC.

2.1.1. Manutenção Centrada em Confiabilidade

Esta metodologia vem a ser uma forma eficaz para que se possa escolher a melhor política de manutenção, e assim estabelecer o plano de manutenção mais adequado para cada equipamento, pois estuda as funções e falhas funcionais de cada item, relaciona as causas das falhas com respectivos efeitos e define ações pró-ativas de manutenção, observando aspectos de qualidade, segurança, meio ambiente e produção. A MCC combina várias técnicas e ferramentas para a administração da manutenção, como por exemplo, as árvores de decisão e a análise do modo de falha e efeito, de forma sistemática para apoiar efetiva e eficientemente as decisões de manutenção. Conforme RAUSAND (1998) *apud* FUENTES (2006) o principal objetivo dessa metodologia é reduzir o custo da manutenção, excluindo as ações desnecessárias, eliminando tarefas ineficientes da manutenção preventiva. Através desta informação, a empresa desenvolve o conhecimento profundo sobre o equipamento, compreendendo seu contexto operacional, as implicações sobre a comunidade, as práticas operacionais vigentes e os padrões de desempenho desejados. A MCC se baseia na suposição de que a confiabilidade de um equipamento é uma função da qualidade do projeto e da construção. Um programa de manutenção preventiva assegura a realização dessa confiabilidade, mas não a incrementa. O incremento da confiabilidade só é possível por meio de re-projeto ou modificações de equipamento. Sua análise pode ser feita como uma sequência de passos, mas são iterativos já que, à medida que o processo avança o pessoal adquire mais experiência e pode visualizar melhor as funções e, irá corrigir o processo fazendo as modificações, eliminação ou agregação com mais segurança, conforme figura 1.

O seu melhor desempenho ocorre quando é aplicada desde as primeiras etapas do projeto de equipamentos para evoluir à medida que o projeto avança. No entanto, pode ser usada para avaliar programas de manutenção preventiva com a finalidade de introduzir melhoramentos. Podendo a mesma ser descrita através de suas principais características:

- A preservação da função, ou seja, a identificação dos modos de falha que podem afetar a função;
- A priorização dos requisitos da função (por meio dos modos da falha);

- A seleção das tarefas de manutenção que sejam efetivas. MCC pode, entre outros fatores, melhorar a disponibilidade, confiabilidade e segurança do sistema.

Segundo FUENTES (2006), a MCC foi projetada visando equilibrar os custos e os benefícios, com o propósito de se obter o melhor programa de manutenção preventiva, com um custo mínimo.

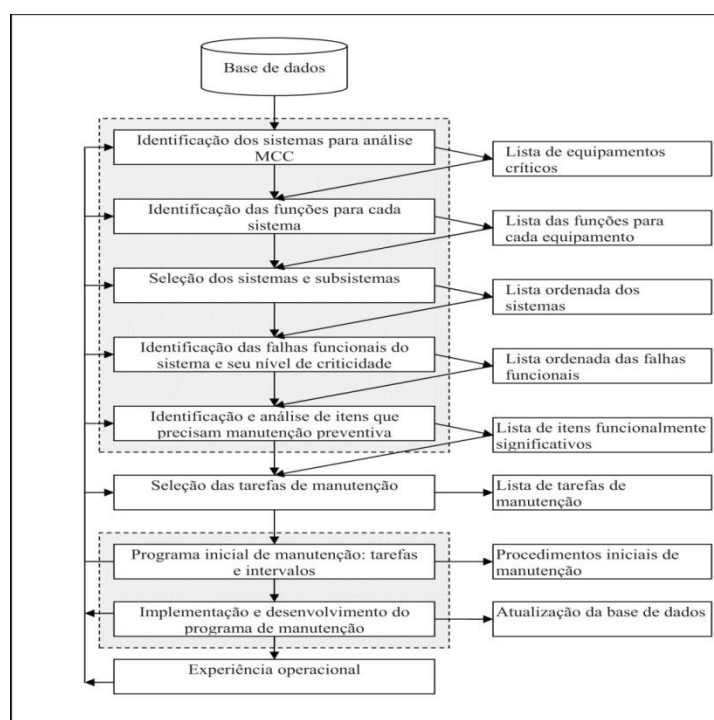


Figura 1 – Etapas na aplicação da MCC

Fonte - Fuentes (2006).

2.1.1.1. Características da confiabilidade

Segundo o *US Military Handbook*, de 1970, pode-se definir confiabilidade como “a probabilidade de um item executar sua função sob condições predefinidas de uso e manutenção por um período de tempo específico. Em qualquer referência sobre definição de confiabilidade é apresentado os seguintes parâmetros (MENDES, 2005):

- Desempenho específico é esperado (funcionalidade),
- Condições de uso determinados,
- Período de tempo definido,
- Grandeza estatística.

Logo, sendo t uma variável aleatória definida como o tempo até ocorrer a falha, obtemos assim a função densidade de probabilidade de ocorrência de falha $f(t)$. Desta forma, podemos definir a probabilidade de falha num dado um intervalo de tempo específico por:

$$f(t).\Delta t = P\{t < t < t + \Delta t \}$$

Ao se integrar $f(t)$, temos a função de probabilidade acumulada $F(t)$, que é definida como a probabilidade de uma falha ocorrer até o tempo t :

$$F(t) = P\{t < t\}$$

A função acima é crescente com o tempo e tendendo a um valor unitário uma vez que o tempo tende ao infinito, ou seja, maior a probabilidade de falha, quanto maior o tempo decorrido, conforme indicado na figura 2 a seguir.

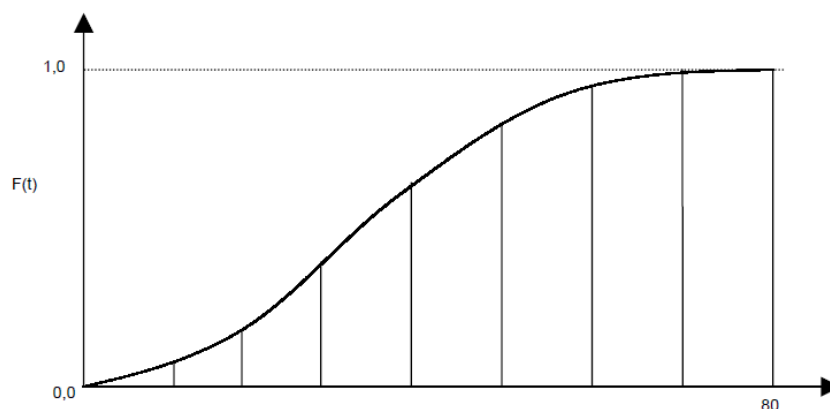


Figura 2 – Função de probabilidade acumulada.

2.1.1.2. Análise da função de probabilidade acumulada $F(t)$ x tempo

Baseado na definição de confiabilidade, pode-se dizer que existem dois estados para um equipamento, o estado de operação normal e o de falha, que são mutuamente excludentes, logo, podemos definir a função confiabilidade $R(t)$ como (MENDES, 2005):

$$R(t) = P\{t > t\}$$

ou seja, confiabilidade é a função complementar à probabilidade de falha, conforme figura 3:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

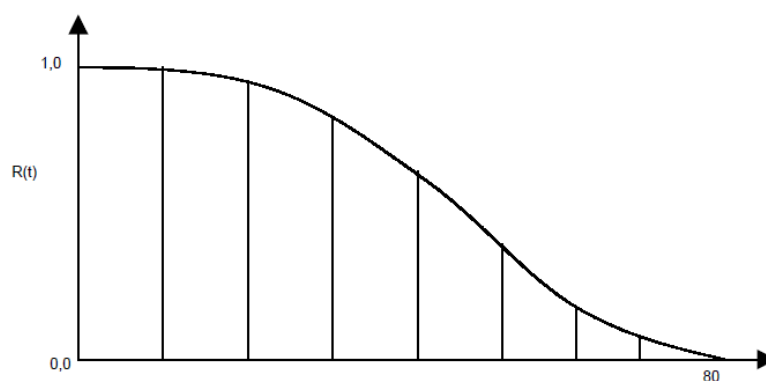


Figura 3 – Função confiabilidade.

2.1.1.3. Análise da função de confiabilidade

Conforme definições anteriores e baseado nas figuras 2 e 3, sabe-se que a confiabilidade diminui ao longo do tempo e somente atinge o valor de 100% quando o equipamento é posto em operação. Também, sabe-se que a vida útil de um equipamento é determinada no momento em que o mesmo atinge um determinado nível de confiabilidade determinado no seu projeto.

Na engenharia de manutenção baseada em confiabilidade é extremamente importante controlar a confiabilidade. No controle da confiabilidade são adotadas medidas de confiabilidade. Neste caso os valores de confiabilidade são obtidos por meio da taxa de falhas. Neste trabalho a taxa de falha é representada por $\lambda(t)$. A taxa de falhas é a probabilidade de um sistema falhar num instante de tempo t , dado que ainda não falhou até um instante de tempo $t - \Delta t$, ou seja, $\lambda(t)$ expressa a taxa de falha instantânea. A taxa de falhas é calculada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

O comportamento da taxa de falha em função do tempo é representado pela curva da banheira, conforme figura 4 a seguir, que demonstra graficamente esta relação para um sistema simples sem redundância (MENDES, 2005).

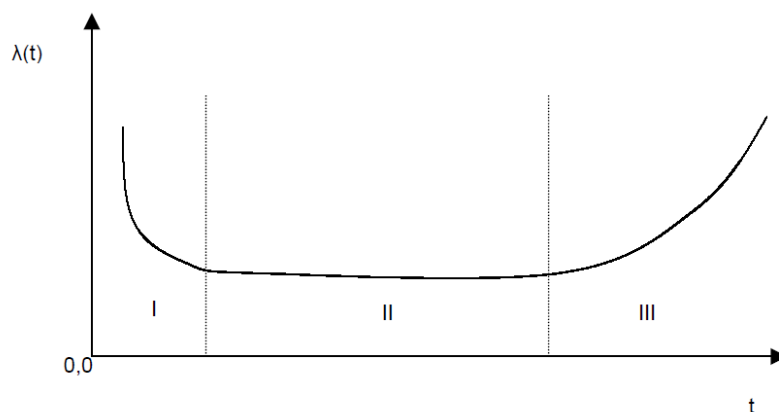


Figura 4 – Curva da banheira.

2.1.1.4. Análise da representação gráfica da curva da banheira

No gráfico acima, o intervalo de tempo definido por I é uma região de altas taxas de falha, chamada de mortalidade infantil, normalmente relacionadas a problemas de fabricação, montagem ou mesmo de material. No intervalo de tempo II, indica as mais constantes e menores taxas de falha e é definido como o período de operação do sistema. Nesta região as falhas são chamadas aleatórias, e decorrem mais pelos carregamentos inesperados e inevitáveis do que falhas propriamente do equipamento. Na fase III, a taxa de falha é crescente e as causas de falha tem origem no próprio desgaste natural do sistema, em virtude da sua fase final de vida útil, normalmente decorrentes da corrosão, fadiga, atrito, entre outros fatores. O rápido crescimento desta taxa define o critério de quando uma peça deve ser trocada e determinando assim, o final de sua vida útil.

A curva da banheira representada anteriormente é considerada genérica, pois para cada tipo de equipamento ou sistema, existe uma curva característica. No caso de sistemas eletro-eletrônicos, a curva é representada pelas regiões I e II, ou seja, existe mortalidade infantil e os mesmos apresentam taxa de falha aleatória, sem apresentar características de envelhecimento. Para os sistemas mecânicos temos que a variação temporal de sua taxa de falha encontra-se nas regiões I e III, sendo que os elementos mecânicos têm como característica falharem normalmente por desgaste, corrosão ou fadiga. Pode-se assim, afirmar que a natureza da variação temporal da taxa de falha de um sistema advém da distribuição probabilística na qual pode ser modelado o sistema, ou seja, para cada tipo de equipamentos ou sistema, pode-se modelar a confiabilidade a partir de uma distribuição diferente, por exemplo, normal, weibull, exponencial etc (MENDES, 2005).

3. As Bombas no Processo de Refino de Petróleo

Baseado na metodologia do MCC, a organização deve estabelecer as políticas e os planos de manutenção de todos os equipamentos dispostos em sua estrutura produtiva. No caso das refinarias, este plano de manutenção deve ser adequado às particularidades de cada equipamento presente. Como visto, a refinaria é composta por uma grande estrutura operacional, no qual estão dispostos uma série de equipamentos, e um dos principais equipamentos responsáveis por bombear o petróleo é a bomba centrífuga.

Segundo TAKANO e D'OLIVEIRA (2007) as bombas centrífugas são responsáveis pela transferência de produtos, dando pressão e vazão. O principal componente que sofre desgaste é o eixo das bombas e ocorre principalmente nos seus eixos de apoio (selos mecânicos e mancais). Na figura 5 uma representação de uma bomba centrífuga.

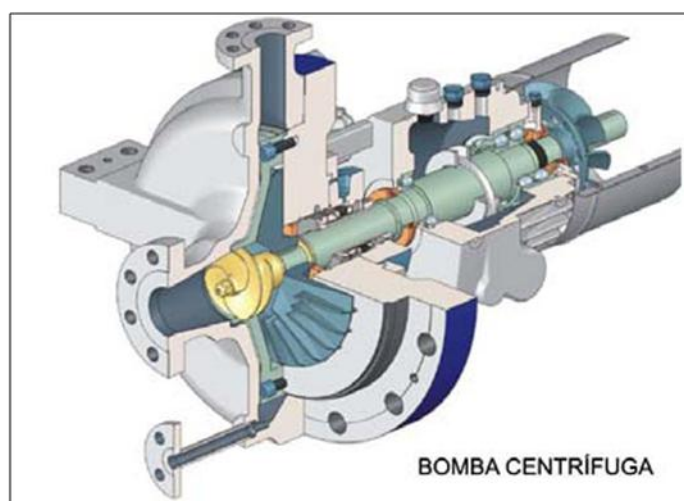


Figura 5 - Esquema da Bomba Centrífuga
Fonte: Takano e D'oliveira (2007).

Se uma destas bombas apresentar problemas de funcionamento, tal acontecimento pode proporcionar as seguintes consequências:

- Parada da Produção que acarretará em atrasos na entrega, perda de produtividade, resultando na redução da lucratividade.

- Parada no fluxo do material, proporcionando desestabilização da linha, o que pode acarretar em problemas de outros equipamentos que se encontram ligados a ela, devido à existência de pressão no sistema, de esforço ou qualquer outra condição que venha a surgir.

No geral a refinaria terá um grande prejuízo financeiro devido a ocorrência de problemas com as bombas de transferência. Este prejuízo financeiro vem a ser resultado da ocorrência de queda de produtividade, ocorrência de acidentes e pode também proporcionar a quebra de outros equipamentos ligados a linha.

Pode-se definir as bombas como máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um fluido transformando seu trabalho mecânico em energia. Alguns autores chamam de máquinas hidráulicas por deslocarem líquidos. Segundo BRASIL (2010) tanto o modo pelo qual é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica como o recurso para cedê-la ao líquido aumentando sua pressão e/ou sua velocidade permitem classificar as bombas em dois grandes grupos apresentados pelo “*Hydraulic Institute*”:

- Bombas de deslocamento positivo, hidrostáticas ou volumétricas;
- Turbo - bombas chamadas também hidrodinâmicas ou rotodinâmicas ou simplesmente dinâmicas.

Conforme a figura 6, as bombas de deslocamento positivo possuem fluxo pulsante, enquanto que as bombas de deslocamento não positivo apresentam fluxo contínuo. As bombas utilizadas nas refinarias são as de fluxo contínuo de deslocamento não positivo.

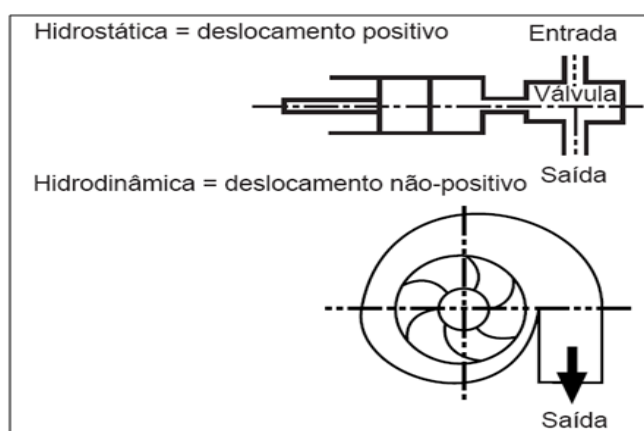


Figura 6 - Classificação dos tipos de bombas
Fonte: Brasil (2010).

Segundo RODRIGUES (2005) as bombas centrífugas, também conhecidas por Turbo Bombas, apresentam a movimentação do fluido em função da ação de forças que desenvolvem na massa do mesmo em consequência da rotação de um eixo. Neste eixo é acoplado um disco (rotor, impulsor) dotado de pás (palhetas, hélice), o qual recebe o fluido pelo seu centro e o expulsa pela periferia pela ação da força centrífuga. Estas Bombas podem ser divididas em três grupos, estes relativos a direção do movimento do fluido dentro do rotor:

- Centrífugas Radiais (puras): A movimentação do fluido dá-se do centro para a periferia do rotor, no sentido perpendicular ao eixo de rotação. Este tipo de bomba hidráulica é o mais usado no mundo;
- Centrífugas de Fluxo Misto (hélico-centrífugas): O movimento do fluido ocorre na direção inclinada (diagonal) ao eixo de rotação e
- Centrífugas de Fluxo Axial (helicoidais): O movimento do fluido ocorre paralelo ao eixo de rotação.

Sabe-se que as Bombas Centrífugas atuam sob severas condições de serviço. Problemas no seu funcionamento surgem através de danos decorridos de fenômenos hidráulicos de sua operação. Através disto, seus componentes estão sujeitos ao desgaste acelerado, podendo acarretar na destruição destes e da bomba, causando problemas sérios na produção da refinaria. Em seu trabalho MISQUIATI (2005) relata os principais fenômenos hidráulicos responsáveis por causar grandes danos nas bombas hidráulicas de fluxo radial ou centrífugas como sendo: recirculação interna de sucção, recirculação interna na descarga, síndrome da palheta passante e cavitação clássica.

4. Teoria de Filas

MIRANDA *et al.* (2006) descrevem a Teoria das Filas como sendo um conjunto de teoremas, que envolvem cálculos probabilísticos, quais visam explicar o comportamento de atendimento a serviços enfileirados, sendo que, o estudo de Teoria de Filas trata o fenômeno de aguardar em fila usando medidas representativas da performance do sistema, tais como comprimento médio da fila, tempo médio de espera na fila entre outros. O estudo de Teoria das Filas pertence a área de pesquisa operacional, estando também ligada aos processos estocásticos. As filas ocorrem porque a procura do serviço é maior do que a capacidade de atendimento. A Teoria de Filas existe para encontrar uma solução através da matemática que satisfaça o cliente e seja viável economicamente. De acordo com CARRIÓN (2007) a teoria das filas tem por objetivo aperfeiçoar o desempenho de um sistema reduzindo seus custos operacionais. Para que possa atingir o objetivo de otimizar o desempenho dos modelos de filas de espera, faz-se necessário analisar os resultados gerados por fórmulas apropriadas a um modelo específico. Estes resultados devem permitir a realização da análise de uma situação particular, onde eles podem ser gerados manualmente substituindo os dados de entrada nas fórmulas ou então estes podem ser obtidos através de um programa de computador. Com a aplicação da teoria de filas, há o estudo do dimensionamento do processo aumentando produtividade, evitando perdas financeiras e diminuindo as filas geradas. Assim, analisando as medidas de desempenho do modelo escolhido, pode-se avaliar e alterar o número de servidores, as taxas de atendimento e de chegadas.

PRADO (1999) *apud* MIRANDA *et al.* (2006) descreve que as filas são constituídas dos seguintes elementos: população, entidade, servidor e serviço. Um sistema de filas de espera, figura 7, pode ser descrito através de seis características básicas: padrão de chegada dos clientes, padrão de serviço dos servidores, disciplina de filas, capacidade do sistema, número de canais de serviço e número de estágio de serviços (COSTA, 2006).

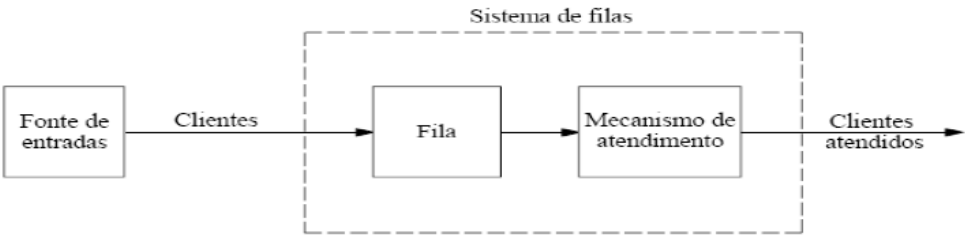


Figura 7 – Sistema de filas

4.1. Modelos de Fila

O modelo M/M/1, figura 8, é definido como o sistema no qual os clientes chegam, são atendidos e logo desocupam o sistema. Este modelo é definido como um sistema markoviano e o algarismo 1 indica a existência de um único servidor. Sua principal característica é a predominância de um único servidor e os tempos entre chegadas dos clientes e tempos para atendimento são bem descritos por uma distribuição exponencial. Conforme FREITAS FILHO (2008), λ representa a taxa de chegadas durante um período de tempo determinado. A variável μ representa a taxa de atendimento. A taxa de utilização do sistema é definida como $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$. O sistema deverá ter $\lambda < \mu$ ($\rho < 1$) caso contrário o sistema se torna instável, ou seja, a fila não parará de crescer.

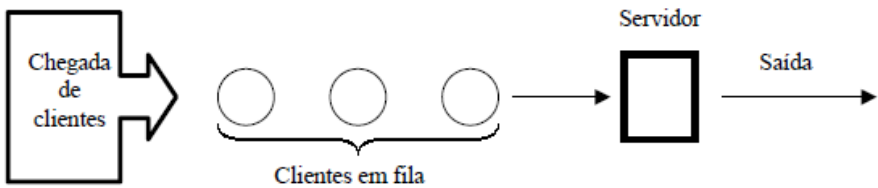


Figura 8 – Modelo de fila M/M/1.

Para se fazer um estudo analítico deste sistema, pode-se calcular os parâmetros operacionais conforme tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Parâmetros operacionais do modelo M/M/1

| Parâmetros | Símbolo | Fórmula |
|--|---------|--|
| Número esperado sistema | L | $\frac{\lambda}{\mu - \lambda}$ |
| Número esperado na fila | L_q | $\frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$ |
| Tempo previsto de espera (inclui o tempo de serviço) | W | $\frac{1}{\mu - \lambda}$ |
| Tempo previsto na fila | W_q | $\frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$ |
| Probabilidade de que o sistema esteja vazio | P_0 | $1 - \frac{\lambda}{\mu}$ |

Fonte - Adaptado de Moore e Wheatherford (2005).

O modelo M/M/c é definido como o sistema que apresenta uma única fila de clientes, porém com vários servidores. Cada servidor possui tempo de serviço com distribuição exponencial idêntica e independentemente distribuída e com processo de chegada dado por uma Poisson. Se existem mais que c clientes no sistema, todos os c servidores devem estar ocupados com uma taxa média de serviço μ e com a taxa média de saída do sistema igual $c\mu$. O M/M/c é aplicado em casos de população infinita (COSTA, 2006). A taxa de utilização do sistema é calculada por $\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$. A seguir as equações para os parâmetros operacionais, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros operacionais do modelo M/M/c

| Parâmetros | Símbolo | Fórmula |
|---|------------|--|
| Probabilidades de o sistema estar vazio | P_0 | $\frac{1}{\sum_{j=0}^{c-1} \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^c}{(s-1)!(s-\rho)}}$ |
| Probabilidade de que todos os canais estejam ocupados | P_{ocup} | $\frac{\rho^s}{(s-1)!(s-\rho)} P_0$ |
| Número esperado na fila | L_q | $\frac{P_0 (\lambda / \mu)^s \rho}{s! (1-\rho)^2}$ |
| Número esperado no sistema | L | $L_q + \rho$ |
| Tempo previsto na fila | W_q | $\frac{L_q}{\lambda}$ |
| Tempo previsto de espera (inclui o tempo de serviço) | W | $W_q + \frac{1}{\mu}$ |

Fonte - Adaptado de Hillier & Lieberman (2006).

O modelo M*/M/c/K/FIFO é caracterizado por tempos de atendimento e tempos de chegada distribuídos exponencialmente, com uma população finita de tamanho K. O tamanho K da população serve como um limitante natural do sistema. Possui c servidores que atendem os clientes com uma disciplina de fila FIFO. Neste modelo o usuário depois de atendido é liberado e retorna à população original. As taxas de chegada e de atendimento são dadas abaixo (FOGLIATTI e MATTOS, 2007):

$$\lambda_n = \begin{cases} (K-n)\lambda, & 0 \leq n < K, \\ 0, & n \geq K \end{cases}$$

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu, & 1 \leq n < c, \\ c\mu, & c \leq n \leq K \end{cases}$$

Este modelo é o adequado para o estudo de caso a ser apresentado, ou seja, para manutenção de equipamentos, pois é sabido que a população é finita, ou seja, a quantidade de bombas centrífugas é limitada a um valor determinado. A analogia do processo proposto com o sistema M*/M/c/K/FIFO informa que a distribuição das entradas das OS's

no sistema é análogo à taxa de falha que é facilmente demonstrada por $\lambda = \frac{1}{TMEF}$, com unidade OS/hora, onde TMEF é definido como Tempo Médio Entre Falhas. A taxa de execução de serviços é dada por $\mu = \frac{1}{TMPR}$, com OS/hora, onde TMPR é o Tempo Médio Para Reparo e o tempo de fila é análogo ao tempo de *back log* registrado no sistema de gestão de manutenção. Portanto, neste processo qualquer falha gera a abertura de uma ordem de serviço (OS). Esta OS entra em *back log*, ou seja, na fila de espera, e passa a ser executada quando o centro de manutenção está disponível para atendê-la e a mesma é executada num tempo médio dado pelo indicador TMPR. Na tabela 4 é dado as fórmulas aplicadas no M*/M/c/K/FIFO, suas respectivas variáveis e descrições:

Tabela 4 - Parâmetros operacionais do modelo M*/M/c/K/FIFO

| Descrição | Variável | Fórmula |
|--|-----------------|---|
| Taxa de Ocupação | ρ | $\rho = \frac{\lambda_{eff}}{c\mu}$ |
| Número Médio de Usuários Trabalhando | λ_{eff} | $\lambda_{eff} = \lambda \cdot (K - L)$ |
| Intensidade de Tráfego | r | $r = \frac{\lambda}{\mu}$ |
| Probabilidade de encontrar o sistema desocupado ou vazio | P_0 | $P_0 = \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{K!}{(K-n)!n!} r^n + \sum_{n=c}^K \frac{K!}{(K-n)!c!c^{n-c}} r^n \right]^{-1}$ |
| Número médio de bombas centrífugas no sistema | L | $L = L_q + \frac{\lambda_{eff}}{\mu}$ |
| Probabilidade de haver Usuários no sistema | P_n | $P_n = \begin{cases} \frac{K!}{(K-n)!n!} r^n P_0, & 1 \leq n < c, \\ \frac{K!}{(K-n)!c!c^{n-c}} r^n P_0, & c \leq n \leq K \end{cases}$ |
| Número médio de bombas centrífugas na fila | L_q | $L_q = L - c + \sum_{n=0}^{c-1} (c-n)P_n$ |
| Tempo médio de bombas centrífugas no sistema | W | $W = \frac{L}{\lambda(K-L)}$ |
| Tempo médio de bombas centrífugas na fila | W_q | $W_q = \frac{L_q}{\lambda(K-L)}$ |

Fonte – Adaptado de Fogliatti e Mattos (2007).

5. Estudo de Caso

As refinarias de petróleo precisam atuar de maneira a obter a máxima eficiência. Todo equipamento, durante sua vida útil, apresenta falhas afetando o seu desempenho. Com isso, um dos focos deve ser a confiabilidade da manutenção. Porém, para que haja sucesso neste processo a equipe deve ser bem alocada e proporcional a sua demanda.

Quando não há proporcionalidade, a equipe de manutenção gera um *backlog*¹ cada vez maior e difícil de ser controlado por prioridades da rotina diária. Com o montante de bombas aguardando manutenção, recursos extras são constantemente solicitados para colocar esses equipamentos em operação, pois gera um estoque de bombas aguardando manutenção. Dentre os diversos equipamentos existentes nas refinarias, destaca-se no presente estudo as bombas centrífugas de transferência. Através do setor de manutenção da refinaria, os dados das bombas centrífugas (gargalo da manutenção) que falharam, durante um período de tempo, puderam ser coletados para análise e tratados (amostra). Os dados foram coletados de um sistema SAP ERP. Segundo FREITAS FILHO (2008) a palavra chave nas questões de amostragem é a representatividade, ou seja, a amostra deve ser a mais realista possível do seu universo. Quanto maior o tamanho da amostra, mais certeza se terá quanto a sua representatividade. Portanto, a etapa seguinte foi a análise da distribuição de frequência para a identificação da distribuição de probabilidade do λ e do μ baseado nos testes de aderência básicos.

Assim, por meio da Teoria de Filas será averiguado se o setor está trabalhando em seu ponto ótimo de capacidade de mão-de-obra, será definido os indicadores de desempenho do sistema de manutenção e avaliar os seus custos.

O modelo M*/M/c/K/FIFO, adotado neste trabalho e conforme demonstrado anteriormente, é caracterizado por possuir uma população finita K, onde K é a população finita de bombas centrífugas na refinaria. Onde há c servidores aos quais respeitam uma disciplina de filas FIFO (*First In, First Out*), ou seja, a primeira bomba centrífuga que sofrer manutenção corretiva deverá ser a primeira a ser entregue a operação.

Para o presente trabalho, foi retirada uma amostra do total dessas bombas. As bombas com potências entre 0,5 e 40 Hp foram selecionadas, com isto, possuímos uma amostra de 110 bombas. A seguir foram feitos os testes de aderência Qui-quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (K-S) para confirmar as hipóteses básicas do modelo, ou seja, para taxa de chegada (ou de falha) $\lambda = 3,25$ bombas/mês e taxa de atendimento μ (ou de execução dos serviços) = 3,00 bombas/mês. Também, foi feita a análise de probabilidade de significância (p), obtendo-se valores de p maiores que 0,05. Estes testes estatísticos foram feitos no software SPSS 14 e confirmaram as hipóteses básicas, ou seja, o intervalo entre chegada e o tempo de atendimento são dados por uma distribuição exponencial (FREITAS FILHO, 2008).

Após, esta etapa foram feitos cenários mantendo-se a taxa de chegada fixo, pois é uma variável incontrolável e variou-se a taxa de atendimento ($\mu = 3,00$; $\mu = 3,30$ e $\mu = 3,60$) e o número de servidores c (entre 2 e 100), pois são variáveis controláveis. Desta forma, foi possível analisar o custo e os indicadores de desempenho do setor de manutenção. Estes cenários foram executados pelo software *Mathematica 6*.

A seguir os resultados obtidos para a situação atual e os cenários executados. Contudo, antes definiremos o modelo de custos a ser aplicado no trabalho.

$E(CE)$ é o custo esperado de bombas centrífugas no sistema (fila e ser atendido) por unidade de tempo. Logo, $E(CE) = L * Cw$.

Onde: L é o nº de máquinas paradas no sistema (fila e ser atendido)

¹ *Backlog* é um indicador da manutenção que representa o acúmulo de serviço num determinado período de tempo, ou seja, o tempo de fila.

C_w é o custo das máquinas paradas no sistema por unidade de tempo. O seu valor é R\$ 30.000,00.

$E(CC)$ é o custo esperado do serviço por unidade de tempo. Portanto, $E(CC) = c \cdot C_c$.

Onde: c é o nº de servidores

C_c é o custo do servidor por unidade de tempo. O seu valor é R\$ 7.8400,00.

$E(CT)$ é o custo total esperado por unidade de tempo. Desta forma, $E(CT) = E(CE) + E(CC)$.

Para o sistema atual temos os seguintes resultados.

| Situação atual | | | | | | | |
|----------------|-------|-----|------------------|---------|---------|--------|--------|
| λ | μ | c | $E(CT)$ | L | L_q | W_q | W |
| 3,25 | 3,00 | 8 | R\$ 1.496.672,64 | 47,6153 | 39,6153 | 1,6506 | 1,9839 |

Analisando os resultados acima, observa-se que a situação atual do setor de manutenção apresenta um tempo médio no sistema (W) de aproximadamente de 2 meses. Este resultado é muito alto. A quantidade de bombas no sistema (L) tem um valor de aproximadamente 48 bombas. Isto é reflexo do resultado anterior. Por conseguinte, o custo total esperado é R\$ 1.496.672,64. A causa destes resultados é o baixo contingente de servidores c (equipes de manutenção) que é igual a 8. Comparando com a situação real, os resultados do modelo estão bem próximos. Portanto, este modelo pode ser usado para executar cenários que poderão auxiliar os gestores na tomada de decisão.

A seguir os resultados obtidos nos cenários gerados.

| Cenários executados | | | | | | | |
|---------------------|-------|-----|------------------|---------|--------|---------|--------|
| λ | μ | c | $E(CT)$ | L | L_q | W_q | W |
| 3,25 | 3,00 | 30 | R\$ 1.115.220,18 | 29,2216 | 1,2951 | 0,01545 | 0,3487 |
| 3,25 | 3,30 | 29 | R\$ 1.066.740,27 | 27,8722 | 1,1553 | 0,0131 | 0,3161 |
| 3,25 | 3,60 | 28 | R\$ 1.022.430,62 | 26,6612 | 1,0775 | 0,0116 | 0,2894 |

Como o foco destes cenários é o custo total esperado mínimo, ou seja, o ponto ótimo do processo de otimização, temos que a melhor situação seria $\lambda = 3,25$ bombas/mês, $\mu = 3,60$ bombas/mês, $c = 28$ servidores e $E(CT) = R\$ 1.022.430,62$. Onde, este cenário apresenta os melhores indicadores de desempenho em relação a situação atual, ou seja, $L = 26,6612$ bombas, $L_q = 1,0775$ bombas, $W_q = 0,0116$ meses e $W = 0,2894$ meses. Assim, pode-se observar que melhorias significativas são obtidas com quedas acentuadas em todos os indicadores de desempenho. Acima de $\mu = 3,60$ todos os indicadores aumentam sistematicamente.

6. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do setor de manutenção de uma refinaria baseado em teoria de filas e fazendo em conjunto, uma analogia com os conceitos de confiabilidade. Para exemplificar o estudo foi analisado o comportamento do

setor de manutenção para bombas centrífugas com potências entre 0,5 e 40 Hp.

Apesar do estudo de Teoria de Filas ser limitado, o mesmo apresentou resultados satisfatórios. Através da Teoria de Filas foi escolhido o modelo $M^*/M/c/K/FIFO$ que se mostrou adequado para o problema a ser resolvido, uma vez que os resultados apresentados pelo modelo se aproximaram dos resultados reais deste setor.

Com os cenários executados, a gerência de manutenção obteve as informações mais importantes para tomada de decisões em relação à produtividade e os custos da manutenção, ou seja, o ponto ótimo de desempenho do setor, conforme abaixo.

| λ | μ | c | E(CT) | L | Lq | Wq | W |
|-----------|-------|----|------------------|---------|--------|--------|--------|
| 3,25 | 3,60 | 28 | R\$ 1.022.430,62 | 26,6612 | 1,0775 | 0,0116 | 0,2894 |

Durante o trabalho observou-se dificuldades quanto a aquisição de dados, pois o sistema SAP ainda está em fase de implantação, o que levou a uma depuração maior dos dados para garantir maior confiabilidade nos resultados apresentados. Outra dificuldade encontrada para este estudo foi a ineficiência da planilha Excel quando solicitada para os cálculos desejados dos indicadores de desempenho. Com isto foi necessário o uso de outros softwares, tais como: SPSS 14 e *Mathematica* 6 que apresentaram desempenho satisfatório.

Atualmente esta empresa vem desenvolvendo um projeto, por meio do PCM – Planejamento e Controle de Manutenção, onde estão usando os dados da manutenção do SAP para implementação do MCC.

Portanto, a próxima etapa será analisar a manutenção usando um simulador de eventos discretos para obter respostas mais consistentes levando em consideração mais variáveis que impactem na produtividade e custos da manutenção.

7. Referências Bibliográficas

ABRAMAN. A **Manutenção Brasileira no Contexto Mundial**. Editorial da Revista Manutenção. Maio / Junho 2004. Edição 98.

ANDRADE, Ednardo B. **Apostila de Gestão da Manutenção**. Florianópolis, CEFET/SC, 2002.

BONIFÁCIO, Marcos Antonio. **Manutenção Industrial: Uma Discussão entre a Relação dos Investimentos Aplicados e os Resultados Operacionais e Ambientais Obtidos**. Araraquara – SP; Centro Universitário de Araraquara – UNIARA; 2005.

BRASIL, Alex Nogueira. Bombas – **Classificação e Descrição**. **Apostila da disciplina de Máquinas Termo-hidráulicas de Fluxo**. 2010. Material disponível no Site Alex Brasil. Disponível em: <
http://www.alexbrasil.com.br/arquivos/maq_fluxos/capitulo3_bombasclassificacaoedescricao.pdf.

CARRIÓN, Edwin Arturo. **Teoria das Filas como Ferramenta para Análise de Desempenho de Sistemas de Atendimento: Estudo do Caso de Um Servidor da UECE**. Dissertação de Mestrado. Fortaleza – Ceará; Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará – CEFET-CE. 2007.

COSTA, Luciano Cajado. **Apostila da disciplina de Teorias das Filas e Simulação**. Centro Tecnológico da Universidade Federal do Maranhão – UFMA. Maranhão, 2006.

FOGLIATTI, Maria C.; MATTOS, Néli M. C. **Teoria de Filas**. Editora Interciência. RJ. 2007.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução a modelagem e simulação de sistemas**, Florianópolis, Visual Books, 2008.

FUENTES, F. E. **Metodologia para Inovação da Gestão de Manutenção Industrial**. Tese de Doutorado. Florianópolis. UFSC, 2006.

HILLIER, Frederick S. & LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8ª Edição. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

MENDES, Alexandre C. **Aplicação da simulação de teoria de filas nos estudos de confiabilidade e otimização de equipes de manutenção**. 20º Congresso Brasileiro de Manutenção. ABRAMAN. 2005

MIRANDA, Juliano Coelho *et al.* **O Software ARENA**. Monografia. Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG, Varginha – MG, 2006.

MISQUIATI, Daniel Lopes. **Análise das Condições Operacionais de Bombas Hidráulicas de Fluxo Radial de Grande Porte**. Dissertação. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

MOORE, Jeffrey H. & WEATHERFORD, Larry R. **Tomada de decisão em administração com planilhas eletrônicas**. 6ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2005.

PINTO, A. K. ; XAVIER, J. N. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro. Qualitymark, 1999.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda J. **Mecânica de Fluidos – Bombas Hidráulicas**. Apresentação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia; São Paulo; 2005.

SOUZA, Rafael Doro. **Análise da Gestão da Manutenção Focando a Manutenção Centrada na Confiabilidade: Estudo de Caso MRS Logística**. Monografia. Juiz de Fora – MG; Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.

TAKANO, Edson Hiromassa; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M. **Proteção de Eixos de Bombas Centrífugas pelo Processo PTA**. Artigo publicado no VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial; Curitiba – PR. 03 a 05 de out. 2007.

VIANA, H. R. G. **PCM - Planejamento e Controle da Manutenção**, Rio de Janeiro; Qualitymark, 2002.