

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

HEITOR CABRAL BOTELHO

ANÁLISE DOS TEMPOS DE REPARO EM
SISTEMAS REDUNDANTES DO TIPO *COLD*
***STANDBY* COM ALTERNÂNCIA**

Porto Alegre

2016

Heitor Cabral Botelho

**ANÁLISE DOS TEMPOS DE REPARO EM SISTEMAS REDUNDANTES DO
TIPO *COLD STANDBY* COM ALTERNÂNCIA**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Porto Alegre

2016

Heitor Cabral Botelho

**ANÁLISE DOS TEMPOS DE REPARO EM SISTEMAS REDUNDANTES DO
TIPO *COLD STANDBY* COM ALTERNÂNCIA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Ricardo Cassel, Ph.D.
Coordenador PMPEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Michel José Anzanello, Ph.D. (PPGEP/UFRGS)

Prof^a. Angélica Alembrent Mendes, Dr^a. (UFSM)

Eng. Giovani Dalpiaz, Dr. (PETROBRAS)

AGRADECIMENTOS

Faço aqui meus agradecimentos às pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho:

À minha esposa, Nórís Honscha Botelho, pelo apoio, paciência, pelo tempo de convivência de que abriu mão, pelas revisões.

Aos meus filhos, Anneliese Honscha Botelho e Vinícius Honscha Botelho. Em especial à Anneliese pelas revisões e sugestões, sempre pertinentes.

Ao meu gerente Albair de Camargo que facilitou no que pode a liberação para participar do curso e é responsável pela escolha dos objetivos.

Ao colega Gilmar Pereira da Silva pelo socorro, sempre bem vindo, quanto ao uso do Excel.

Ao colega Eng. Rudimar Trarbach e ao meu pai Heitor Machado Botelho, por terem no estudo e no aprendizado um valor de vida e que, sempre estiveram mais empolgados com a minha participação em um programa de mestrado do que eu próprio.

Ao colega Eng. Giovani Dalpiaz, à Prof. Angélica Alembant Mendes e ao Prof. Michel Anzanello pela participação na banca.

Ao professor José Luis Eduardo Ribeiro, por toda a paciência e orientação que prestou durante este tempo.

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa Nóri e aos meus filhos Anneliese e Vinícius aos quais atribuo esta e muitas das minhas conquistas.

RESUMO

Nas indústrias química e petroquímica o uso de sistemas redundantes é comum. Exceto pelos programas de lubrificação, a estratégia de manutenção adotada para estes sistemas é, principalmente, a manutenção corretiva. Os objetivos desta dissertação são, a partir do registro do histórico de falhas dos equipamentos de uma unidade fabril petroquímica e conceitos de confiabilidade, estimar o tempo limite que estes sistemas podem operar sem intervenções de manutenção, mantendo a disponibilidade do sistema em níveis adequados. Esse tempo limite foi usado para desenvolver um indicador a ser utilizado no processo de priorização das atividades de manutenção. Para atingir os objetivos foram desenvolvidas as seguintes etapas: a) revisão dos dados de confiabilidade; b) elaboração de modelagem de sistemas de bombeamento. Inicialmente foi realizada uma revisão dos dados de confiabilidade coletados pela empresa em estudo, a partir da qual se obteve análise dos problemas encontrados com os dados, sumário de procedimentos a serem adotados para cada tipo de problema e sugestões para evitar sua reincidência. Por meio dos resultados iniciais, foi elaborada a modelagem de sistemas de bombeamento, utilizando o método de Monte Carlo. Obteve-se, como resultado, curvas de disponibilidade do sistema *versus* tempos para reparo. O método proposto é simples de ser utilizado em campo e, definida a disponibilidade desejada para o sistema redundante, permite o cálculo do máximo tempo para reparo do equipamento em falha.

Palavras-chave: Confiabilidade. Sistemas Redundantes. Tempo Para Reparo. Monte Carlo. *Cold Standby*. Disponibilidade. Dados de Falhas. Manutenção.

ABSTRACT

In chemical and petrochemical industries redundant systems are usual. Except by lubrication programs, the maintenance strategy adopted for these systems is mainly corrective maintenance. Considering the historical failure records of the equipment of a factory and the use of reliability concepts, the goal of this work is to estimate the maximum time that these systems can operate without maintenance interference, while keeping the system availability on adequate levels. This maximum time was used to develop an indicator to be used in the process of prioritization of maintenance activities. To achieve these goals, the following steps have been developed: a) reliability data review; b) elaboration of a pumping system model. Initially, a review of the reliability data collect at the studied company was performed, from which an analysis of the problems encountered at these data, a summary of procedures to be adopted for each type of problem, and suggestions to avoid its recurrence were established. As a consequence of first results, a model for each pumping system using the Monte Carlo method was developed and availability curves of the system versus time to repair were obtained. The proposed method is simple to use in the field and, considering the desired availability for the redundant system, it allows the calculation of the maximum time to repair equipment failures.

Keywords: reliability. Time to repair. Cold standby. Monte Carlo. Redundancy. Failure data. Availability. Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LISTA DE VERIFICAÇÃO.....	30
FIGURA 3 - PAINEL DE ACOMPANHAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DINÂMICOS.....	47
FIGURA 4 - OPERAÇÃO DE UM SISTEMA EM COLD STANDBY COM ALTERNÂNCIA	55
FIGURA 5 DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO	60
FIGURA 6 - ALGORITMO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA EM COLD STANDBY COM ALTERNÂNCIA.....	63
FIGURA 7 SUB-ROTINA PARA CÁLCULO DOS TEMPOS ATÉ A FALHA.....	64
FIGURA 8 - PAINÉL DE ENTRADA DE DADOS	65
FIGURA 9 - TELA DE RESULTADOS	65
FIGURA 10 - CURVA DISPONIBILIDADE X TEMPOS PARA REPARO DO SISTEMA DE BOMBEIO B-6AB	69
FIGURA 11 - CURVA DISPONIBILIDADE X TEMPOS PARA REPARO DO SISTEMA DE BOMBEIO B-1AB	69

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- PROBLEMAS E SOLUÇÕES EM BANCOS DE DADOS DE CONFIABILIDADE	27
QUADRO 2 - COMPILAÇÃO DOS DADOS DE FALHAS DE UM EQUIPAMENTO	32
QUADRO 3- DADOS DE FALHAS ANALISADOS E REFORMATADOS	33
QUADRO 4 - REGRAS DE DECISÃO PARA CORREÇÃO DE REGISTROS DE CONFIABILIDADE.	37
QUADRO 5 - SUGESTÕES PARA MELHORIA DA COLETA DE DADOS X BIBLIOGRAFIA.....	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - SITUAÇÃO DOS REGISTROS APÓS TRIAGEM BASEADA NA LISTA DE VERIFICAÇÃO	31
TABELA 2 - QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS VERSUS TIPOS DE ARRANJOS	57
TABELA 3 - EXEMPLOS DE DADOS DE CONFIABILIDADE APÓS TRATAMENTO PARA UM EQUIPAMENTO	66
TABELA 4 - PARÂMETROS DE FORMA PARA EQUIPAMENTOS DA UNIDADE AVALIADA	66
TABELA 5 - TEMPOS PARA REPARO X DISPONIBILIDADE DOS SISTEMAS (%)	68
TABELA 6 - SISTEMAS X TEMPO MÁXIMO PARA REPARO PARA UMA DISPONIBILIDADE DE 99%	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
	1.1TEMA E OBJETIVOS	14
	1.2JUSTIFICATIVA	15
	1.2.1 Justificativa do tema	15
	1.2.2 Justificativa dos objetivos.....	15
	1.3MÉTODO	16
	1.3.1 Método de Pesquisa	16
	1.3.2 Método de Trabalho.....	16
	1.4DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	17
	1.5ESTRUTURA DO TRABALHO	18
	1.6REFERÊNCIAS.....	18
2	Problemas e lições aprendidas no tratamento de dados de confiabilidade de uma empresa do setor petrolífero	20
	2.1INTRODUÇÃO	20
	2.2REFERÊNCIAL TEÓRICO	22
	2.2.1 Conceitos de confiabilidade.....	22
	2.2.2 Coleta de dados de falha.....	23
	2.2.3 Problemas nos Registros de Falhas	25
	2.2.4 Janelas de observação e Tempos entre falhas.....	27
	2.3METODOLOGIA	28
	2.3.1 Definição das informações consideradas imprescindíveis	28
	2.3.2 Priorização dos registros analisados	29
	2.3.3 Resgate dos dados de confiabilidade	29
	2.3.4 Análise dos dados	30
	2.3.5 Diagnóstico	30
	2.4RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
	2.4.1 Lista de Verificação com as informações consideradas imprescindíveis. 31	
	2.4.2 Coleta dos dados de confiabilidade	31
	2.4.3 Análise dos registros.....	32
	2.4.4 Consolidação dos dados e cálculo dos tempos entre intervenções.....	33
	2.4.5 Diagnóstico	33
	A análise da Figura 2 permite as seguintes observações:	33
	2.4.6 Problemas encontrados nos registros de falhas	35
	2.4.7 Regras para correção dos registros	36
	2.4.8 Sugestões para melhorar a coleta de dados	40

2.5	CONCLUSÕES	43
2.6	REFERÊNCIAS.....	43
3	Aplicação de técnicas de confiabilidade na priorização das manutenções em sistemas com redundâncias tipo “cold-standby”	46
3.1	INTRODUÇÃO	46
3.2	REFERENCIAL TEÓRICO	49
3.2.1	A gestão da manutenção	49
3.2.2	Análise estatística	50
3.2.3	Modelagem de sistemas redundantes	53
3.3	METODOLOGIA	56
3.3.1	Definição do objeto	57
3.3.2	Tratamento dos dados de falha	57
3.3.3	Cálculo das taxas de falha dos equipamentos e componentes.....	59
3.3.4	Modelagem dos sistemas com uso de diagrama de blocos.....	59
3.3.5	Identificação dos modelos mais adequados para representar os diferentes sistemas em estudo	61
3.3.6	Modelo de simulador para o cálculo da disponibilidade do sistema	61
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.5	CONCLUSÕES	71
3.6	REFERÊNCIAS.....	72
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
4.1	CONCLUSÕES	75
4.2	PROPOSIÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	76

1 INTRODUÇÃO

Sistemas redundantes constituem a grande maioria das configurações das instalações nas indústrias petroquímicas e de petróleo. Esta opção decorre, principalmente, dos valores envolvidos em possíveis perdas de produção devido a falhas de equipamentos e, em casos mais raros, por segurança ou riscos ambientais que podem decorrer da ocorrência dessas falhas.

Por definição, em sistemas cujas falhas são aleatórias e não associadas a algum mecanismo de deterioração em função do tempo, não há ganhos de confiabilidade ao se realizar manutenções preventivas (MOUBRAY, 1997). Por esta razão, a estratégia de manutenção adotada nestes sistemas é a manutenção corretiva, associada a algum tipo de monitoramento de condição, não para evitar a falha, mas para antecipar sua detecção, minimizando os danos e reduzindo os tempos para reparos e custos de manutenção. Para descobrir falhas ocultas e garantir que todos os equipamentos do sistema estão funcionais, a empresa objeto de estudo nesta dissertação realiza um rodízio dos equipamentos titulares e reservas. Esta estratégia gera um tipo especial de sistema com redundância, denominado na literatura como sistemas com redundância e alternância, em inglês, *alternating cold standby* (MOKKADIS;TAWFEK;ELHSSIA, 1997; GOEL; TYAGI; GUPTA, 1992 e MURARI; MARUTHACHALAM, 1982).

Independentemente da estratégia de manutenção adotada, durante o período em que algum dos equipamentos do sistema está em reparo, o sistema opera sem redundância, tornando-se um ponto frágil na operação da planta. Esta situação gera uma preocupação adicional às gerências operacionais para que o equipamento reserva torne a ser disponibilizado o mais brevemente possível. Essa preocupação é externalizada na forma de aumento da quantidade de sobressalentes em estoque, aumento na quantidade de horas extras realizadas e disputa entre as gerências para que os equipamentos de suas plantas sejam priorizados em detrimento das demais plantas.

A priorização dos serviços em sistemas industriais é fundamental para que os recursos sejam utilizados de forma eficiente, especialmente quando a quantidade de solicitações supera os recursos disponíveis. Em geral, os métodos de priorização baseiam-se em regras heurísticas e, no senso comum, derivado da experiência (LI; NI, 2009). Ocorre que o senso comum pode ser equivocado devido a crenças errôneas como, por exemplo, a crença de que as falhas ocorrem devido ao desgaste no tempo (MOUBRAY, 1997).

Entende-se que, se os equipamentos ou componentes de um sistema falham pouco, este sistema pode trabalhar sem sua redundância por um tempo maior. Por outro lado, se os equipamentos de outro sistema têm uma taxa de falhas maior, há uma necessidade de que sua redundância retorne mais brevemente, de forma a garantir que o sistema não falhe. Os casos de equipamentos ou componentes em que as falhas são aleatórias, não associadas a mecanismos de deterioração e cujas taxas de falhas podem ser consideradas constantes, são bem representados por funções exponenciais (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Isso traz como consequência, devido a falta de memória da função exponencial (ROSS, 2014), a não existência de uma vida útil definida (SIKORSKA; HODKIEWICZ; MA, 2011). Mesmo assim, se os parâmetros da função são diferentes de um equipamento para outro, os tempos entre falhas dos sistemas serão diferentes, e será possível obter uma priorização das intervenções.

Para obterem-se as funções de densidade de falhas de cada equipamento ou componente, o ideal é usar dados da própria planta (SMITH, 2011; BLESER; CHAME; ALVARENGA, 2013 e HAUPTMANN, 2011) por representar as condições reais de uso observadas na empresa específica. Os registros não são perfeitos e sua transformação em informação útil é custosa em termos de tempo por exigir que sua análise seja feita manualmente, registro a registro.

Na literatura se encontram estudos de sistemas do tipo *alternating cold standby* através de cadeias de Markov ou processos semi-Markovianos, limitadas a quando as funções de densidade de falha podem ser representadas por funções exponenciais (MOKKADIS; TAWFEK; ELHSSIA, 1997, GOEL; TYAGI; GUPTA, 1992). A forma mais fácil de analisar esses sistemas é através do uso da metodologia de Monte Carlo (SEO; JANG; BAI, 2003 e KAYA; PERVANE; DEMIRHAN, 2012)

1.1 TEMA E OBJETIVOS

Esta dissertação tem como tema o estudo da confiabilidade de sistemas com redundância e submetidos à alternância. O estudo é limitado apenas à ocorrência de falhas aparentes e considera todas as falhas que afetem de forma significativa a disponibilidade do sistema. Esta análise sobre quais componentes devem ser considerados é feita através da representação do sistema na forma de diagramas de blocos e a significância é analisada pelo número de vezes que os componentes falham.

Os objetivos gerais do trabalho são: (i) definir o tempo máximo que um sistema pode operar sem sua redundância em função de uma disponibilidade requerida do sistema (no

estudo, esse tempo é o mesmo que o tempo para reparo); e (ii) criar um indicador que permita auxiliar aos tomadores de decisão priorizar a sequência das intervenções, baseado no histórico dos sistemas e técnicas estatísticas.

Para chegar a esses objetivos gerais, algumas etapas necessárias tiveram de ser cumpridas, constituindo objetivos específicos:

- a) Tratar os registros existentes nos bancos de dados da empresa de forma a torná-los passíveis de uso para o estudo. Como consequência desta etapa obteve-se um diagnóstico dos problemas e uma proposição de regras para correção desses registros;
- b) Identificar os modos de falha relevantes para serem considerados e inseridos em diagramas de blocos e nos cálculos de confiabilidade;
- c) Modelar os dados de falha analisando-se se as amostras podem ser consideradas similares, obtendo as funções de densidade de falha e desenvolvendo uma rotina computacional que realize as simulações para os sistemas estudados.

1.2 JUSTIFICATIVA

1.2.1 Justificativa do tema

Esta dissertação tem como tema o estudo da confiabilidade de sistemas redundantes que apresentam um equipamento como titular e outro como reserva (1 de 2), com a particularidade que eles estão submetidos à alternância periódica. Isto é, um equipamento opera como titular por um período. No período seguinte, o equipamento reserva passa a ser titular enquanto o outro é posto na reserva. Esse tipo de arranjo e estratégia de operação responde por aproximadamente 88% dos sistemas da fábrica em estudo sendo, portanto, de grande relevância para este tipo de indústria.

1.2.2 Justificativa dos objetivos

Uma vez que os sistemas redundantes com alternância constituem 88% dos sistemas da fábrica em estudo, as discussões quanto à priorização dos serviços de manutenção concentram-se, na prática, sobre sistemas com esse tipo de arranjo. Já foram citados na introdução deste trabalho autores que afirmam que as discussões são fortemente influenciadas pelo fator humano. Acrescentando-se que este tipo de unidade fabril é composto de várias unidades menores, todas interdependentes, há vários impasses que são decididos baseados no maior ou menor poder de convencimento das partes interessadas.

Obter um indicador baseado em prazos para tornar os equipamentos disponíveis para a operação e, esses prazos sendo calculados a partir da história dos equipamentos, usando

métodos estatísticos e matemáticos precisos, é importante para reduzir a pressão por prazos menores e, com isso, otimizar recursos como mão de obra e sobressalentes.

1.3 MÉTODO

1.3.1 Método de Pesquisa

Seguindo-se a conceituação elaborada por Gil (2002), esta pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa exploratória. Este trabalho proporciona maior familiaridade com um problema, quanto tempo um sistema pode permanecer sem sua redundância e, nas palavras do autor, descobre intuições ao explicitar de forma matemática quais sistemas são prioritários.

Quanto aos métodos de trabalho, é colocado que as pesquisas exploratórias em geral dividem-se em dois grupos: as pesquisas bibliográficas e os estudos de casos. Seguindo-se a conceituação de Gil (2002), o trabalho é um estudo de campo, posto que o estudo é restrito a uma pequena porção do universo de sistemas com redundância, que são utilizadas técnicas de observação e não de interrogação, e há uma participação efetiva do pesquisador na execução dos estudos.

1.3.2 Método de Trabalho

Para se atender aos objetivos propostos, seguem-se nove etapas, que corresponderam à elaboração de dois artigos.

A primeira etapa consistiu em tornar os registros existentes em diversos bancos de dados em informações que pudessem ser trabalhadas posteriormente. Esta etapa gerou o artigo 1 e, é subdividida conforme os parágrafos seguintes.

No artigo 1, inicialmente, seguindo a orientação de Hameed, Vatn e Heggset (2011), foram definidos qual o tipo de estudo seria realizado e, a partir desta decisão, quais as informações necessárias e, o período de acompanhamento. A definição dos dados necessários é uma função direta do tipo de estudo que se pretende realizar e foi feita baseando-se, além dos autores mencionados acima, nas orientações de Smith (2011). A definição do período de interesse passa pela avaliação quanto à validade dos dados e a existência de uma quantidade significativa de registros.

A etapa seguinte consistiu no resgate dos registros dos bancos de dados com a aplicação de filtros adequados e, a transferência desses registros para softwares de planilha, que permitem maior facilidade no manuseio dos registros.

Passou-se a verificação da qualidade intrínseca dos registros. Unsworth *et al.* (2011)

discutem o que são dados com qualidade. A conclusão é que a definição do que são dados de qualidade é um conceito de difícil definição. Para as finalidades deste estudo, cerca de sessenta por cento dos registros resgatados apresentavam problemas quanto à sua qualidade.

Foram definidas linhas de ação para corrigir e tornar os registros aproveitáveis. Essas linhas de ação incluem o retorno às fontes primárias de informações, o cruzamento com dados de outros bancos e, até mesmo, o descarte de registros

Finalmente, os registros foram reformatados, os modos de falha identificados, calculados os tempos entre as falhas, os tempos para reparo e os tempos de vida acumulada para cada equipamento observado. Assim trabalhados, passou a ser possível extrair informações dos registros.

A segunda etapa, que gerou o segundo artigo, pode ser subdividida conforme os parágrafos seguintes.

Os dados tratados no primeiro artigo passaram a constituir amostras de falhas dos equipamentos em estudo. Foram realizados testes, conforme Balaban (2009), para verificar se essas amostras poderiam ser consideradas similares para os equipamentos titulares e reservas, acionadores foram agrupados por tipo de equipamentos e suas amostras também submetidas a testes de similaridade. Foram realizados testes estatísticos que mostraram a adequação das amostras à distribuições exponenciais e então, obtidas as funções exponenciais de cada equipamento ou componente (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Os sistemas redundantes foram modelados através do uso de diagramas de blocos. Na mesma etapa foram identificados os componentes mais relevantes para considerar nos modelos (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Foi escrita uma rotina de programação para simular a operação de um sistema do tipo *alternating cold standby* representando a forma como os sistemas são operados na empresa analisada. Esta simulação foi feita utilizando o método de Monte Carlo. Não se questionou se o modo como os sistemas são operados é a melhor opção. A análise avalia como o sistema se comporta na maneira como é operado.

As rotinas computacionais foram processadas várias vezes, alterando-se os tempos de reparos e obtendo-se para cada tempo de reparo uma disponibilidade do sistema. A partir desses resultados foram construídas curvas de disponibilidade *versus* tempos de reparo.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Esse trabalho abrange apenas sistemas do tipo *cold standby* com alternância. Há outros

tipos de arranjos do tipo *cold standby* na mesma empresa como, por exemplo, dois equipamentos operando e três na reserva, ou dois operando e um na reserva, sempre com alternância. O estudo desses arranjos exige a criação de novas rotinas de computação e, não são tratados neste estudo.

Como já mencionado anteriormente, o estudo abrange exclusivamente falhas aparentes e, manutenções corretivas. A influência das manutenções preventivas (basicamente lubrificação), não foi considerada. Os instrumentos que fazem o chaveamento para a troca dos equipamentos foram considerados como isento de falhas.

Os custos das falhas não foram incluídos neste trabalho porque o objeto é o desenvolvimento de uma metodologia que sirva como apoio no processo decisório do planejamento dos serviços.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado está organizada em 4 capítulos. O capítulo 1 refere-se à introdução do trabalho, definindo tema e objetivos e, delimitando o estudo realizado. Os capítulos 2 e 3 apresentam os artigos que compõem esta dissertação. O primeiro artigo aborda os problemas de qualidade dos dados e procedimentos para sua correção. O segundo artigo discute as técnicas de confiabilidade e estatística aplicadas sobre os dados de falha para, calcular a disponibilidade e a mantenedibilidade dos equipamentos. O capítulo 4 apresenta uma Conclusão do estudo realizado, retomando seus objetivos e apresentando os principais resultados alcançados.

1.6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14224**: Indústrias de petróleo e gás natural – Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2011. 225 p.

BALABAN, Harold S. Reliability Models and Data Analysis for Repairable Products. In: PECHT, Michael *et al.* **Product Reliability, Maintainability, and Supportability Handbook**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2009. Cap. 12. p. 299-324. ISBN: 978-0-8493-9879-7.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

GOEL, L. R.; TYAGI, P. K.; GUPTA, Rakesh. Cost analysis of a two-unit chargeable standby system with interchangeable units and two types of failure. **Microelectron Reliability**, v. 32, n. 6, p. 775-779, 1992.

HAUPTMANN, Ulrich. Reliability data acquisition and evaluation in process plants. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.266-273, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2010.09.005>.

KAYA, Ekin; PERVANE, Can; DEMIRHAN, Hayar. A Generic Monte Carlo Simulation Algorithm For The Availability Prediction Of The Devices With Cold Stand-By Units. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN SYSTEM SIMULATION, 4., 2012, [s.l.]. **ARTICLE**. [s.l.]: IARIA XPS, 2013. v. 1, p. 11 - 17. Disponível em: <http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=simul_2012_1_30_50109> . Acesso em: 10 abr. 2016.

LI, Lin; NI, Jun. Short-term decision support system for maintenance task prioritization. **International Journal Of Production Economics**, [s.l.], v. 121, n. 1, p.195-202, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.006>.

MOKADDIS, G S; TAWFEK, M L; ELHSSIA, S A M. Analysis of a two-dissimilar unit cold standby redundant system subject to inspection and random change in units. **Microelectronics Reliability**, [s.l.], v. 37, n. 2, p.329-334, fev. 1997.

MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance**. 2. ed. Nova York: Industrial Press Inc., 1997. ISBN 978-0-8311-3164-3.

MURARI, K.; MARUTHACHALAM, C.. A system with two subsystems working in alternating periods. **Microelectronics Reliability**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.405-412, jan. 1982. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(82\)90016-6](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(82)90016-6).

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. ISBN 978-85-352-3353-7.

ROSS, Sheldon. The Exponential Distribution and the Poisson Process. In: ROSS, Sheldon. **Introduction to Probability Models**. 11. ed. Oxford: Academic Press, 2014. Cap. 5. p. 277-356. ISBN: 978-0-12-407948-9.

SEO, J.H.; JANG, J.S.; BAI, D.S.. Lifetime and reliability estimation of repairable redundant system subject to periodic alternation. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 80, n. 2, p.197-204, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00030-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00030-9).

SIKORSKA, J.Z.; HODKIEWICZ, M.; MA, L.. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v. 25, n. 5, p.1803-1836, jul. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.11.018>.

SMITH, David J. Field data collection and feedback. In: SMITH, David J. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers**. 8. ed. Oxford: Elsevier, 2011. Cap. 13. p. 205-213. (ISBN 978-0-08-096902-2).

UNSWORTH, Kerrie *et al.* Goal hierarchy: Improving asset data quality by improving motivation. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 96, n. 11, p.1474-1481, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2011.06.003>.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: Planejamento e método**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 200 p.

2 PROBLEMAS E LIÇÕES APRENDIDAS NO TRATAMENTO DE DADOS DE CONFIABILIDADE DE UMA EMPRESA DO SETOR PETROLÍFERO

Resumo

Neste artigo, apresenta-se um procedimento para tratamento dos registros existentes nos bancos de dados de uma fábrica de forma a deixá-los com qualidade, formatação e disposição adequadas para a realização de estudos de confiabilidade. Ao longo do estudo, faz-se a recuperação dos registros com vistas a estudos específicos. Baseados nos conceitos de dados, desenvolve-se um lista de verificação a partir da qual faz-se um diagnóstico da qualidade dos registros. Apresentam-se as fontes usadas para o resgate e aproveitamento dos registros considerados não adequados. Mostra-se a necessidade de cruzar informações de bancos de dados de manutenção com dados de Operação e da área financeira para obterem-se dados confiáveis e úteis ao estudo, respeitando condições que derivam do fato que os registros de falhas de equipamentos são processos de contagem de Poisson. Como principais resultados, apresenta-se uma tabela com os erros e omissões comuns em bancos de dados, uma tabela contendo uma série lista de procedimentos de correção a serem adotados em cada situação e, uma tabela com sugestões para evitar a recorrência desses mesmos problemas em registros futuros.

Palavras-chave: Qualidade dos dados. Correção de dados. Registros de falhas. Manutenção. Gerenciamento de ativos

2.1 INTRODUÇÃO

A operação de instalações industriais atendendo a padrões estabelecidos de segurança, máxima disponibilidade dos equipamentos e custos de manutenção adequados requer a utilização de técnicas estruturadas de gestão. Nesse contexto, os conceitos de confiabilidade constituem um elemento importante que deve ser considerados nas atividades gerenciais (LAFRAIA, 2001).

Confiabilidade é a probabilidade de que um componente, um sistema ou processo mantenha suas funções, sem apresentar falhas, por um período de tempo especificado, quando operado corretamente e sob as condições especificadas (BARRINGER, 2004). A determinação de tal probabilidade é possível através do estudo e modelagem dos tempos até a falha do componente ou sistema. Conhecendo-se a distribuição de probabilidade que melhor se ajuste aos tempos entre falhas, é possível estimar a probabilidade de sobrevivência da unidade em estudo para qualquer tempo de interesse. Conhecer a distribuição de probabilidade de falhas possibilita estimar o número de falhas que devem ocorrer em um período de tempo futuro, permitindo prever os recursos humanos necessários para tratar esses eventos e, os sobressalentes necessários para atender essas falhas. Em suma, possibilita fazer um melhor planejamento da manutenção. A modelagem dos tempos até a falha é ponto central

em estudos de confiabilidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Mas, seja qual for o método utilizado para avaliar e quantificar a confiabilidade de um sistema é importante estabelecer e utilizar um banco de dados de falhas e reparos adequado. O uso de dados fidedignos é ponto crucial em qualquer análise de confiabilidade (ABNT, 2011).

Há consenso de que dados de falha específicos dos equipamentos da empresa analisada devem ser utilizados em preferência a dados do setor específico. Se isso não for possível, dados de falha relacionados ao setor específico devem ser utilizados em preferência a dados genéricos (SMITH, 2011; BLESER; CHAME; ALVARENGA, 2013 e HAUPTMANN, 2011). O uso de dados de campo tem a grande vantagem de que as falhas ocorrem em condições reais de uso observadas naquela empresa. Baseadas nessa premissa, as empresas têm trabalhado na construção e no registro de seus próprios históricos de falhas e manutenção.

O problema é que esses registros não são perfeitos e, a transformação desses dados em informação é custosa em termos de tempo. A literatura é farta em propor métodos para modelar e fazer previsões sobre os dados coletados. Ocorre que no universo de publicações consultadas não foram encontradas referências ao trabalho realizado na compilação dos dados. Esta falta de informação deixa a falsa impressão de que, ou os registros já estavam preparados e disponíveis para uso, ou é um trabalho de menor importância. Tampouco há recomendações sobre como proceder para corrigir e completar os registros dos arquivos.

A proposta geral deste trabalho é, a partir do estudo dos registros de dados de confiabilidade de equipamentos industriais, gerar orientações para que os mesmos possam ser trabalhados. Quando necessário, serem corrigidos de forma adequada para posterior utilização em estudos de confiabilidade. Os objetivos específicos compreendem: (a) coletar os registros de confiabilidade de uma empresa do setor petróleo; (b) apoiado na literatura e no estudo de campo, propor procedimentos para corrigir os problemas encontrados nos registros já efetuados e recomendações para aprimorar o processo de inserção de registros futuros desta empresa.

Este artigo está organizado em cinco seções. Após esta introdução, a seção 2.2 apresenta um referencial teórico abordando a coleta de dados de confiabilidade, os problemas citados na literatura e possíveis causas dos problemas e a utilização desses dados. A seção 2.3 apresenta o método de trabalho que contemplou a análise e a utilização do banco de dados da empresa em avaliação. A seção 2.4 apresenta os resultados obtidos, destacando-se um diagnóstico dos dados da empresa, revelando suas deficiências e, apresentando recomendações para o aproveitamento dos mesmos e propondo medidas para evitar a proliferação de problemas. Por fim, a seção 2.5 apresenta as conclusões do estudo.

2.2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico está dividido em quatro partes. Na primeira, são abordados os conceitos de falha e modos de falha. Na segunda parte, trata-se de como a literatura aborda o processo de coleta de dados. Na terceira, apresentam-se os problemas comuns com registros de falhas citados na literatura consultada e, finalmente, na última parte, as consequências de se considerar os processos de contagem de falhas em equipamentos submetidos a processos renováveis como processos de contagem de Poisson.

2.2.1 Conceitos de confiabilidade

Os conceitos apresentados neste capítulo são todos retirados da norma ABNT (2011). Outros autores (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009, LAFRAIA, 2001) conceituam esses termos com pequenas variações mas entende-se que a norma traz uma consolidação do que existe na literatura.

Estado de falha de um item é a sua incapacidade de realizar a função para a qual foi projetado mas, a própria norma e Hauptmanns (2011) colocam que há uma dificuldade em definir claramente quando um item não está mais apto para realizar a sua função no âmbito da empresa analisada. Bloch e Geitner (1986) citam o exemplo de uma bomba de processo cujo selo vaza e perguntam: Quando um vazamento de selo mecânico passa a ser considerado excessivo e torna o item inoperável? Esse limite desafia a obtenção de um critério de medição objetivo. Depende, em geral, de uma avaliação subjetiva. Acrescentando complexidade ao problema, Barringer (2004) discute que o estado de falha varia com a rigidez dos critérios de aceitação, critérios esses que podem, inclusive, variar ao longo do tempo. Os autores colocam que os limites de tolerância a partir do qual o equipamento é considerado em falha devem ser definidos objetivamente, sendo, talvez, um critério válido apenas para aquela determinada planta.

Modo de falha é o efeito pelo qual uma falha é observada no item que falhou. Em aplicações práticas, a descrição do modo de falha tende a escorregar para uma descrição da causa da falha ou para a descrição do efeito da falha. Isso vai depender muito do nível em que se quer conduzir o estudo ou análise. O modo de falha em um nível pode ser a causa da falha em outro (RAUSAND; ØIEN, 1996).

O período de observação é o tempo de calendário, o tempo decorrido entre a data de início e a data de fim da coleta de dados. Embora o período de observação seja um intervalo de tempo de calendário entre dois tempos específicos e possa ser definido com precisão, o tempo de operação não é tão simples de determinar. Tempo até a falha entende-se o tempo

transcorrido do momento em que um equipamento ou componente é colocado em operação até o momento da falha (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Para alguns equipamentos rotativos, o tempo de operação é registrado em um contador e sua leitura pode ser feita com precisão. Muitas vezes é necessário estimar o tempo de operação com base no conhecimento da equipe de operação e manutenção. Como a verdadeira taxa de falha de um item deve ser calculada com base na operação propriamente dita, convém que se dê prioridade à coleta ou estimativa desse parâmetro. Smith (2011) chama a atenção para o fato de que o uso de tempos de operação é mais complicado que o tempo de calendário.

O termo tempo de reparo utilizado neste trabalho é o mesmo que o tempo não operacional definido na norma. Consiste no tempo de calendário desde que o equipamento é parado para reparo até o momento em que é religado para o serviço a que se destina.

2.2.2 Coleta de dados de falha

Bleser, Chame e Alvarenga (2013) propõem uma abordagem para a obtenção de dados para realizar estudos de confiabilidade em empresas do setor de óleo e gás. Esta abordagem consiste em usar os dados existentes nas empresas. Mas, admite que as fontes de informação não podem ser restritas somente a esses dados. Esses autores apresentam um conjunto de perguntas que foram estruturadas para orientar a seleção da fonte de dados mais adequada para cada circunstância. Por exemplo, se a unidade ou planta está operacional provavelmente há algum tipo de registro de dados. Sendo este o caso, segue-se a segunda questão: há dados de falhas disponíveis? Para companhias em operação deve haver algum tipo de registro. Geralmente são registros associados a equipamentos específicos. A próxima pergunta é se os dados têm representatividade estatística. Por representatividade estatística os autores querem saber se: i) a quantidade de informação é suficiente, relevante, consistente e completa; ii) qual o tempo que será necessário para detalhar e tratar os dados, e quais as incertezas associadas a esse processo. No trabalho citado é colocado claramente que a falta de dados válidos ou sem representatividade estatística não é incomum e, nesses casos, a orientação é que se recorra aos técnicos e operadores experientes da companhia. Eles serão as fontes para se obter as taxas de falhas e tempos de reparos. Smith (2011) reforça esta orientação ao afirmar que o conhecimento desses técnicos pode ser mais preciso e, algumas vezes mais valioso, que os dados escritos. A justificativa para esta afirmação é de que os dados são escritos e, passam do executante para a pessoa que registra os dados, desta para os analistas. No processo, os dados podem perder sua precisão devido aos pontos fracos da cadeia. Isto se explica porque o relato de ocorrência de falhas depende de pessoas e, portanto, está sujeito a erros, omissões e más

interpretações. Por isso, Smith (2011) recomenda que a coleta dos dados seja feita através de uma documentação formal.

Conforme Hauptmanns (2011), a base dos dados de falha usados nas análises de confiabilidade são os relatórios de manutenção. O autor reconhece que os relatórios de manutenção e as informações que existem nos sistemas de informações computadorizados para gestão da manutenção (SICGM) são coisas diferentes e, por isso, ele recomenda que, quando existentes, as informações constantes nesses sistemas também podem e devem ser utilizadas. Tanto os relatórios como os registros nos SICGM são destinados a outras finalidades que não estudos de confiabilidade. Isso torna difícil a recuperação de informações de confiabilidade. Por esse motivo, a análise dos dados precisa ser feita manual e individualmente (MARCORIN; ABACKERLI, 2006). Unsworth *et al.* (2011) apontam que, na coleta de dados, há elementos no processo de diagnóstico de falhas difíceis de serem automatizados. Consideram que a captura desse conhecimento é ponto chave no processo de coleta de dados. Esses elementos no processo de diagnóstico são analogias, metáforas, histórias, estratégias pessoais que dão uma compreensão do “como e do porquê” por detrás da estratégia que determinado empregado usa para abordar um problema ou tarefa e, são muito difíceis de serem reduzidos a escritos ou procedimentos (HOLSTE; FIELDS, 2010).

Esta discussão traz à pauta a questão da qualidade dos dados. Unsworth *et al.* (2011) tenta uma definição afirmando que os dados de qualidade são àqueles dados corretos que estão no lugar e no momento certo para permitir a realização de uma tarefa. Karr (2011) segue mais ou menos na mesma linha. Este último dispõe que dados têm várias dimensões que representariam a sua qualidade intrínseca. Seriam elas precisão, dados completos, consistência, validade. Este autor apresenta um quadro de decisões possíveis a partir de uma análise preliminar dos registros: i) o descarte dos dados nos casos em que a qualidade é tão pobre que não há possibilidade de utiliza-los; ii) segregar os dados para um possível uso mas sem tentar melhorá-los o que recomenda para quando as fontes de consulta para fazer essa melhoria não estejam disponíveis; iii) melhorar os dados quando os recursos para tanto são disponíveis e, finalmente; iv) dados em que as melhorias não são requeridas.

As principais estratégias propostas para garantir a qualidade dos dados durante a aquisição são o uso de sistemas de qualidade (ABNT, 2011 e HAUPTMANN, 2011) e a restrição das entradas de dados através do uso de códigos padronizados nas máscaras ou formulários de inserção de dados do banco de dados (KARR; SANIL; BANKS, 2006 e ABNT, 2011). Mas, somente essas ações não garantem que os dados arquivados estão corretos porque, mesmo com essas máscaras em uso, as informações podem ser introduzidas

de forma incompleta ou errônea. Hauptmanns (2011) explica que isso ocorre devido ao fato dos relatórios serem considerados como tediosas obrigações adicionais e, por isso, eles não serem feitos ou, feitos intencionalmente errados para esconder omissões ou erros cometidos pelo pessoal envolvido. Outro motivo citado por este autor pode ser o não entendimento dos conceitos envolvidos e desconhecimento dos equipamentos e das unidades onde operam. Hauptmanns (2011) propõe um sistema de garantia da qualidade em três níveis. A ABNT (2011) propõe a mesma estratégia, mas um sistema com dois níveis. Em ambos, há um nível no qual o próprio executante faz as verificações de consistência e confirma se os dados estão todos preenchidos. No segundo nível, as verificações dos dados individuais são refeitas e somadas a uma avaliação do resultado refletido pela soma dos eventos individuais. E, em ambos, é atribuída uma grande importância à formalização dos procedimentos e a documentação das verificações, de forma que o processo de coleta de um registro possa ser rastreado. Unsworth *et al.* (2011) segue uma linha diferente, propondo treinamento e programas motivacionais para os coletores de dados.

A ABNT (2011) traz uma grande preocupação com a padronização e a rastreabilidade dos procedimentos. Isso se justifica pelo seu objetivo, que é permitir o intercâmbio dos registros. Sandtorv, Hokstad e Thompson (1996) e Hameed, Vatn e Heggset (2011) têm a mesma conotação, uma vez que todos estão preocupados com grandes bancos de dados, compartilhados entre várias empresas. Os autores observam que o trabalho de coleta com a esta preocupação em documentar e haver rastreabilidade dos registros torna este trabalho pesado e caro.

2.2.3 Problemas nos Registros de Falhas

Alguns motivos que os autores Unsworth *et al.* (2011) e Hauptmanns (2011) apontam como impeditivos para o êxito do processo de coleta são a falta de treinamento, a falta de procedimentos de orientação, a falta de estrutura de gerenciamento adequada, a baixa prioridade atribuída à coleta, os problemas de interpretações pessoais e as dificuldades em manter pessoal com a competência adequada.

A ABNT (2011) cita problemas que podem ocorrer durante a aquisição dos dados: i) As fontes podem não ter todos os dados e estes podem estar espalhados em diversos sistemas diferentes; ii) Os dados são compilados para formatos padronizados e, nesse processo, pode haver diferentes interpretações; iii) Há preocupação quanto ao formato dos dados e quanto aos métodos de coleta; iv) falta de competência ou motivação. A referida norma não informa o que fazer com os dados já existentes, a não ser uma rápida recomendação de que deve ser

estabelecido um sistema para lidar com desvios encontrados no processo de coleta dos dados e, os problemas devem ser solucionados assim que possível. Há um alerta final de que a correção de dados distorcidos pode tornar-se uma tarefa complexa após a coleta de muitos dados.

Smith (2011) se preocupa em listar os problemas encontrados com os dados de confiabilidade propriamente ditos. Segundo esse autor, os principais problemas são: (i) os relatórios raramente mencionam a quantidade de itens, as datas de instalação e os tempos de operação; (ii) falta de motivação para preencher os formulários; (iii) uma vez que os dados deixam a pessoa que os informou, eles não são mais verificados. Se os dados são obtidos de outras oficinas, a possibilidade de corrigir as informações é ainda mais remota; (iv) relatórios de falha são custosos em termos de tempo para preenchê-los e tempo para interpretar essa informação; (v) registro de não falhas: o autor se refere ao apontamento da primeira peça que foi substituída como sendo a causa da falha e, ao fato de falhas secundárias serem apontadas como falhas primárias; (vi) os tempos até a falha são apontados como uma informação difícil de obter, uma vez que os registros das empresas são incompletos ou desatualizados.

A literatura consultada cita os problemas frequentemente encontrados na prática, associando a cada tipo de problema uma medida de contingência. No Quadro 1 é apresentado um resumo dos problemas citados ao longo do capítulo e as soluções propostas.

Há confusão entre problemas de qualidade dos dados e problemas de modelagem a partir dos dados existentes. Esta literatura aborda os problemas da confiança estatística dos modelos, sem mencionar como os dados foram preparados. Entre os problemas reportados estão: (i) escassez de dados e presença de muitos dados com algum tipo de censura (LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009); (ii) dados dúbios e incompletos; (iii) falta de competência do coletor; (iv) erros tipográficos; (v) perda de informações compulsórias e não compulsórias; (vi) informações questionáveis; (vii) erros de software (HAMEED; VATN; HEGGSET, 2011); (viii) baixa qualidade das descrições de falhas e; (ix) a pequena quantidade de falhas ao longo dos anos (MARCORIN; ABACKERLI, 2006). O problema da escassez de dados é mencionado em praticamente todas as fontes (LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009; MARCORIN; ABACKERLI, 2006; BARRINGER, 1996). Abernethy (1983) apresenta uma discussão mostrando que, conforme a quantidade de falhas se aproxima de 10, os valores das estimativas têm uma maior precisão. Artigos mais recentes recomendam para amostras tão pequenas o uso do teorema de Bayes (HAUPTMANN, 2011). Mesmo assim essas amostras irão gerar intervalos de confiança muito grande.

Quadro 1- Problemas e soluções em bancos de dados de confiabilidade

Problema	Solução
Falta de dados	Planejamento, método de coleta
Dados espalhados	Planejamento, método de coleta
Interpretação diferente dos dados da fonte por indivíduos diferentes	Definições, treinamento e verificações de qualidade ; fóruns, melhorar a comunicação entre as pessoas engajadas
Limitação dos dados coletados em função da utilização de códigos	Incluir campo para texto livre, além dos códigos
Falta de competência e/ou motivação por parte dos coletores	Cuidado na contratação de pessoal com bom conhecimento técnico. Medidas para estimular a equipe de coleta.
Coleta de dados em bateladas é custosa e demorada	Uso de coleta automatizada
Qualidade e disponibilidade de dados varia entre companhias	
Dificuldade de desenvolver especificações para equipamentos complexos gerando interpretações diferentes.	
Coleta de dados históricos faz-se complicada ao ter de interpretar informações incópletas ou dúbias	Processos de garantia da qualidade, comparação dos resultados obtidos com os resultados esperados
Difícil medir o efeito das manutenções preventivas	
Dificuldade em encontrar pessoal com competência para a coleta de dados.	
Poucos dados	Desenvolver metodologia para trabalhar com pequenas amostras; técnicas bayesianas, combinação de dados
Conteúdo da informação é pobre	Avaliação cuidadosa e depuração
Dados censurados	Uso de técnicas estatísticas apropriadas
Truncamento	
Avaliação do efeito das ações de reparo	Ignorar. Assumir a condição de tão bom como novo após o reparo.
Registro de equipamentos substituídos mantidos no arquivo. Equipamentos novos com mesma identificação dos antigos.	Análise detalhada dos resultados e consulta aos técnicos da empresa.
Omissão de informação	Motivação
Incorreções no preenchimento	Motivação
Muito tempo para preencher formulários e interpretar os registros.	Mostrar os ganhos obtidos com as informações. Retroalimentação.
Diagnósticos errados	Instruções de manutenção mais complexas; uso de pessoal mais qualificado.
Registro de falhas secundárias como sendo as falhas primárias	Instruções de manutenção mais complexas; uso de pessoal mais qualificado.
Registros incompletos ou desatualizados	
Uso de tempos de calendário ao invés de tempos de operação	
Janela de observação inadequada	
Amostras não homogêneas	Testes de hipótese para verificar homogeneidade.
Erros tipográficos	Usar formulários e códigos padronizados
Perda de dados obrigatórios e não obrigatórios	Definição clara de fronteiras e quais dados são obrigatórios; incluir no software travas que obriguem ao preenchimento.
Problemas nos softwares	Usar a experiência de outros bancos de dados

2.2.4 Janelas de observação e Tempos entre falhas

Os dados podem ser coletados para toda a vida do equipamento ou por um período mais

curto. A preocupação que permeia toda a discussão na ABNT (2011) é que, se os dados forem coletados em períodos anormais, como uma crise ou na fase de mortalidade infantil, essa quantidade de registros vai fazer com que as curvas de densidade de falhas e os tempos médios entre falhas não representem a atual situação do item ou equipamento.

Hauptmanns (2011) tem outro tipo de preocupação quando discute janelas de observação. Conforme o autor, usualmente os processos de observação dos tempos de vida são considerados processos de Poisson. Está demonstrado em Ross (2014) que, qualquer subconjunto contínuo de eventos regulados por um processo de contagem que seja considerado uma distribuição de Poisson também é uma distribuição de Poisson. A consequência desta propriedade é que a janela de observação pode ser estabelecida em qualquer intervalo de interesse. A vantagem é que não há necessidade de saber quando um equipamento iniciou a operação. A análise e o acompanhamento podem ser feitos a partir de qualquer data estabelecida. Essa propriedade permite, por exemplo, que os dados mais antigos, quando os registros são irrecuperáveis, possam ser descartados. No entanto, a contrapartida, uma vez que o conceito explicita que o subconjunto seja contínuo, esse descarte tem de ser feito para todos os dados anteriores. Esse descarte faz com que ocorra um estreitamento da janela de observação, reduzindo a quantidade de observações disponíveis para a análise em uma situação em que as amostras são, por natureza, pequenas. No Quadro 1 é apresentado um resumo dos problemas citados ao longo do capítulo e soluções propostas na literatura consultada.

2.3 METODOLOGIA

O presente trabalho é um estudo de campo realizado a partir de dados coletados em uma empresa do setor de petróleo. O período de observação ocorreu entre os anos de 1994 e 2013. A partir da análise dos dados de confiabilidade armazenados nos sistemas informatizados foi possível adequá-los para um formato que permite o seu uso para outros estudos de confiabilidade. As etapas executadas para o estudo estão apresentadas na sequência:

2.3.1 Definição das informações consideradas imprescindíveis

Como comentado no capítulo anterior, o primeiro passo a ser realizado em um processo de aquisição de dados para análises de confiabilidade é definir que tipo de estudo será realizado e quais dados são relevantes para o estudo (HAMEED; VATN; HEGGSET, 2011). Smith (2011), Loutit, Pascual e Jardine (2009) e Hauptmanns (2011) apontam quais informações consideram necessárias. Mas, é preciso ter em conta que exceto o primeiro, os

demais têm uma preocupação com o compartilhamento de dados. Nesse trabalho utilizaram-se aquelas informações que são comuns a todos os autores o que resultou em uma quantidade menor de informações. Estas informações são: datas de início e fim de falha, modo de falha e a causa da intervenção, o tipo de equipamento, identificador e o número da Ordem de Manutenção sob a qual foi realizada a manutenção.

A recomendação da literatura é que os tempos entre falhas sejam calculados sobre os tempos de operação. Para atender este requisito pesquisou-se os fluxogramas de processo para identificar quais variáveis, na ausência de tacômetros e amperímetros poderiam servir de contadores.

2.3.2 Priorização dos registros analisados

A quantidade de registros é muito grande, a população de equipamentos abrangida é vasta e, a análise dos registros é feita manualmente e um a um. É necessário se definir uma lista de prioridades quanto à por onde iniciar as revisões. Os critérios usados neste trabalho foram: i) trabalhar com as unidades que tivessem um maior histórico de falhas; (ii) àquelas unidades com maior impacto econômico, prejuízo da imagem ou prejuízo ao meio ambiente; iii) dentre os sistemas, priorizou-se àqueles que tenham variáveis de processo que possam servir como contadores que permitam obter com precisão o tempo médio entre falhas dos equipamentos em operação efetiva; iv) analisou-se primeiro àqueles equipamentos com um volume mais elevado de registros.

2.3.3 Resgate dos dados de confiabilidade

Os dados existentes nos bancos de dados foram resgatados a partir da aplicação de filtros de busca. Os equipamentos desta planta são identificados por um número que identifica a sua posição no processo precedido de uma letra que o identifica como um compressor, uma bomba ou outro tipo de equipamento mecânico. Usa-se mais um prefixo para definir o tipo de atuador (turbina ou motor, por exemplo) e sufixos para diferenciar o equipamento titular do reserva. Usando-se o número com filtros colocados nas posições adequadas foram criadas listas de registros de falhas, resgatando-se de uma única vez todos os registros associados àquele posto de trabalho (registros dos equipamentos acionados e seus acionadores e acessórios além de elementos de tubulação como válvulas de bloqueio, retenções, filtros). Além dos dados de confiabilidade, quando existentes foram resgatados registros operacionais que permitem computar as horas de operação dos equipamentos.

2.3.4 Análise dos dados

A partir das dimensões dos dados propostas no capítulo 2.2, foi montada uma lista de verificação mostrada na Figura 1. Os registros foram submetidos a esta lista. A primeira questão consistiu em verificar se os registros estavam completos, quer dizer, se todos os campos de datas e modos de falha estavam preenchidos. Na sequência, fez-se uma análise da consistência dos dados verificando se os modos de falha estavam coerentes com o motivo da intervenção. Dois exemplos do que se entende por consistência: um vazamento de selo não pode ter a data de início do evento após a constatação do vazamento; uma solicitação de serviço aberta pela preditiva devido a vibrações não pode ter uma data de início se o equipamento ainda estava atendendo ao processo. A validade é verificada nas perguntas sobre os tempos entre falhas e tempos para reparo. Datas de indisponibilidade muito longas, às vezes um ano, não são normais. Tempos entre falhas muito pequenos, às vezes uma ou nenhuma hora de operação são anormais. A superposição de datas em registros diferentes também indica problemas de validade. Em uma última etapa, confrontaram-se as datas de início e fim de falha com os contadores, para garantir que estavam corretas.

Figura 1 - Lista de verificação

Datas de início de falha, data de fim de falha e modo de falha estão preenchidos?
O modo de falha está coerente com o tipo de intervenção realizada?
O modo de falha está coerente com a lista de peças substituídas?
O modo de falha e a causa raiz apontada estão coerentes?
Tempos entre falhas estão dentro de limites razoáveis?
Tempos para reparos estão dentro de limites razoáveis?
No intervalo de tempo em que o equipamento foi registrado como indisponível não há conflito com os registros operacionais?

2.3.5 Diagnóstico

Baseado no que foi praticado na depuração e reorganização dos dados e, na literatura, é apresentado um resumo da situação encontrada. Na sequência são apresentadas as regras de decisão desenvolvidas e utilizadas e, sugestões de medidas que, se adotadas, poderão minorar a recorrência de problemas nas coletas futuras.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e a discussão destes resultados são apresentados na mesma ordem em que foi apresentado o capítulo de metodologia, para uma melhor clareza da exposição.

2.4.1 Lista de Verificação com as informações consideradas imprescindíveis

Há a recomendação (BLOCH; GEITNER, 1986) de se uniformizar o conceito de falha e, de preferência, utilizar critérios objetivos para isso. A prática não é bem assim. Na empresa avaliada quem considera um equipamento em falha são, primeiramente, os operadores ao verificar que uma determinada variável de processo está fugindo às especificações ou, quando da vistoria de área, constatam alguma anormalidade no seu funcionamento. Em segundo lugar, os técnicos que realizam as avaliações preditivas. Estes baseiam seus pareceres principalmente nos níveis de vibração, ruído e temperatura. Antes da confirmação da falha, os técnicos da oficina mecânica fazem testes conjuntos com a operação para um parecer definitivo. De forma geral, os conceitos não estão escritos, mas estão bem compreendidos. Os registros de falhas foram considerados como adequados para o uso em futuros estudos de confiabilidade. Esses estudos serão análises de sobressalentes, estimativas de falhas futuras e a montagem de um programa de priorização dos atendimentos da manutenção, especificamente, para a especialidade de mecânica.

Na Tabela 1, pode-se verificar a situação dos registros após a primeira triagem executada pela aplicação da lista de verificação da Figura 1. Observa-se que apenas cerca de 40% dos registros foram considerados como atendendo aos requisitos de qualidade intrínseca dos dados conforme a definição apresentada no capítulo 2.2.2.

Tabela 1- Situação dos registros após triagem baseada na lista de verificação

Situação dos Registros	Quantidades	%
Adequados	1355	39,13%
Não falhas ou eventos fora das fronteiras do equipamento	999	28,85%
Duplicidade	385	11,12%
Equipamentos substituídos ou desativados	245	7,07%
Datas de início e/ou fim erradas	167	4,82%
Apropriação do evento no equipamento errado	92	2,66%
Registros incompletos. Falta data de início, fim ou ambas.	86	2,48%
Eventos sem evidência da ocorrência.	64	1,85%
Intervenções para realizar modificações ou melhorias.	57	1,65%
Falta de análise da falha.	10	0,29%
Conflito de análise ou motivo da intervenção.	3	0,09%
TOTAL	3463	100,00%

Estes registros segregados exigiram uma pesquisa à relatórios de manutenção, aos registros de consumo de materiais nas fontes primárias e pela aplicação das regras que serão apresentadas nos capítulos seguintes.

2.4.2 Coleta dos dados de confiabilidade

Os dados de confiabilidade estão armazenados em dois bancos de dados. Um banco de dados foi descontinuado em 2012 e os registros foram gerados a partir dos relatórios e

análises de falhas efetuadas na oficina e, inseridos no banco de dados por um técnico ou engenheiro de manutenção designado para realizar esta função. A partir de 2004 a empresa adquiriu um SICGM. Desde então, todas as solicitações de serviço passaram a ser registradas, falhas ou não e, os registros passaram a ser feitos de forma descentralizada. Existem regras para o preenchimento das solicitações de serviço de modo a permitir o cálculo de indicadores gerenciais (TMEF, disponibilidade, problemas crônicos, equipamentos em que foi gasto mais capital) de forma automatizada. Para os estudos de confiabilidade e manutenibilidade este regramento não se mostrou suficiente para que os dados possam ser utilizados sem uma análise manual.

Os registros extraídos foram migrados para planilhas eletrônicas similares à mostrada no Quadro 2, onde estão na sua forma bruta.

Quadro 2 - Compilação dos dados de falhas de um equipamento

Ordem	TAG	Texto breve	Data início	Data fim	Causa básica
	BOMBA	Vaza pelo corpo	25/04/1994	3/05/1994	Desconhecida
	BOMBA	Vazou pelo corpo	23/05/1994	23/05/1994	Desgaste
	BOMBA	Vazou pelo selo	30/09/1995	2/10/1995	Desgaste
	BOMBA	Vibração excessiva	27/12/1995	19/01/1996	Desconhecida
	BOMBA	vazou pelo selo	14/06/1996	25/06/1996	Lubrificação
	BOMBA	Ruído anormal	4/04/2001	5/04/2001	Alinhamento
	BOMBA	Vazamento selo	24/09/2001	19/10/2001	
	BOMBA	Vibração excessiva	30/01/2003	07/02/2003	Alinhamento
2000410762	BOMBA	Isolamento térmico em linhas de sucção			
2000044990	BOMBA	Vazamento caixa mancal	29/09/2003	29/9/2003	
2000119429	BOMBA	Limpeza filtro sucção	13/01/2004	14/1/2004	
2001030092	BOMBA	Revisão geral bomba	12/12/2005	27/12/2005	
2001825889	BOMBA	Revisão geral bomba	10/07/2006	21/7/2006	
2007464219	BOMBA	Revisão geral bomba	1/02/2011	24/3/2011	
2002869504	MOTOR	Anel proteção do rol. solto	24/05/2007	24/5/2007	
2006276147	MOTOR	Vibração	05/02/2007	08/02/2007	Mancais
2003586957	MOTOR	Vibração	18/12/2007	27/2/2008	Mancais
2008387647	MOTOR	Defeito elétrico	05/03/2012	19/03/2012	Queimado
2008711213	MOTOR	Parte indevidamente	14/2/2012	14/2/2012	

2.4.3 Análise dos registros

A primeira verificação realizada nos registros é quanto a relevância dos mesmos. Falhas atribuídas ao equipamento, mas ocorridas fora das fronteiras definidas para esse equipamento (ABNT, 2011) foram segregadas. Em análises posteriores, os registros de componentes fora das fronteiras citadas, mas relevantes para a disponibilidade do sistema foram considerados.

Na busca de informações para recuperar e melhorar os registros foram identificadas as

diversas fontes possíveis de dados de confiabilidade. Utilizou-se frequentemente de novas consultas aos relatórios físicos de manutenção, arquivados em pastas por equipamento, às descrições contidas nas solicitações de serviços (etapa anterior à emissão da Ordem de Manutenção, OM), às OM (por isso, apesar de não serem informações requeridas, constam das tabelas, como pode ser visto no Quadro 2), aos sobressalentes utilizados (tanto no registro da OM como em consultas aos registros do setor de armazenagem) e, na falta de mais informações, entrevistas com os técnicos que trabalharam naquela intervenção específica ou, serviço similar.

2.4.4 Consolidação dos dados e cálculo dos tempos entre intervenções

Os registros corrigidos foram transferidos para uma nova planilha onde, quando existentes, já haviam sido transferidos os registros dos “contadores”. Os registros foram formatados de maneira mais conveniente para os cálculos de confiabilidade subsequentes, como mostrado no Quadro 3.

Quadro 3- Dados de falhas analisados e reformatados

TAG	Texto Breve	Data de início evento	Data de fim do evento	TEF	Componentes substituídos			
					mancal	selo	Junta corpo	Vedação óleo
Bomba	trancamento	27/6/1994	4/7/1994	#N/D	f	s		
Bomba	Óleo contaminado	12/8/1996	22/8/1996	#N/D	f	s		
Bomba	Vazou selo	17/4/1998	20/4/1998	#N/D		f		
Bomba	Vazou corpo	1/6/1998	3/7/1998	#N/D			f	
Bomba	Vazou corpo	7/1/1999	7/1/1999	#N/D			f	
Bomba	Vazou selo	20/4/2000	28/4/2000	N/D#		f		
Bomba	Vazou óleo	23/2/2006	23/2/2006	N/D#				f
Bomba	Vazou óleo	2/5/2006	2/5/2006	365				f
Bomba	Revisão geral	8/2/2010	3/3/2010	23120	f	s		
Bomba	Vazou corpo	17/10/2010	17/10/2010	2697			f	
Bomba	Vibração	18/1/2011	5/12/2011	1112	f	s		
Bomba	Vibração	24/1/2012	13/2/2012	77	f	s		
Bomba	vibração	3/6/2013	13/7/2013	6073	f	s		

Os contadores são variáveis de processo (amperímetros ou indicadores de status para motores e turbinas, manômetros ou termômetros, quando não comuns ao equipamento titular e seu reserva) e, estão arquivados em um banco de dados diferente daqueles dos registros de confiabilidade. Para identificar contadores foram consultados desenhos de processo e os operadores das plantas.

Com uso dos recursos de cálculo e localização do software de planilhas, os tempos entre falhas, tempos acumulados e tempos para reparo foram calculados.

2.4.5 Diagnóstico

A análise do Quadro 2 permite as seguintes observações:

a) A primeira coluna refere-se ao número da ordem de serviço (OM) no sistema de gerenciamento computadorizado onde há campos não preenchidos. Os campos não preenchidos são referentes a registros antigos, anteriores a entrada em operação do sistema de gerenciamento computadorizado.

b) Há registros de falhas e de intervenções que não motivadas por falhas.

c) O texto, um campo de texto livre, descreve o motivo pelo qual o equipamento sofreu intervenção (o modo de falha). Não há uma codificação para a entrada de dados do texto. Cada solicitante escreve a causa da solicitação com seu estilo.

d) A coluna de causa básica (causa raiz) apresenta codificação. Mesmo assim, há muitos registros não preenchidos.

e) Há dados incompletos.

f) Estão registrados os tempos de manutenção, porém não os tempos de operação. Quanto aos tempos de manutenção, não há separação entre os tempos de manutenção ativa e passiva. Se a análise for aprofundada, verifica-se uma grande variação de tempos de manutenção para intervenções em equipamentos similares para um mesmo modo de falha.

g) As três primeiras ocorrências apresentam tempos entre falhas muito pequenos, indicando que o primeiro problema foi mal resolvido e os dois subsequentes são continuação do primeiro.

h) Há dados em duplicidade e nesses, as datas de início e fim da falha mostram divergências.

i) No registro referente à OM 2008387647 (acionador da bomba) o texto diz que o motor foi substituído e, um novo motor foi instalado. Os registros anteriores à data da substituição devem ser aproveitados ou descartados?

j) Não há dados de vida acumulada.

Os dados, na forma como estão apresentados, não são suficientes para realizar os estudos de confiabilidade tradicionais.

Com conhecimento do tipo de equipamento (no exemplo, uma bomba centrífuga tipo OH2, conforme classificação da norma API (2004) e um motor elétrico trifásico com mancais de rolamento), consultas aos relatórios de manutenção, consultas a outras telas do SICGM, conhecimento das políticas de manutenção da empresa e entrevista com os supervisores e técnicos da manutenção é possível transformar os registros acima em uma planilha como aquela no Quadro 3.

No Quadro 3, #N/D indica que não há dados para realizar um cálculo preciso do tempo efetivo de operação do equipamento. Esses dados passaram a existir para este equipamento a

partir do ano de 2006. O tempo efetivo de operação não consta de nenhum banco de dados. A partir dos registros dos contadores, eles são calculados com os recursos de cálculo do software de planilha, como já comentado em seções anteriores. As letras f indicam que o componente foi substituído ou reparado porque este foi o componente que falhou. As letras s indicam que os componentes foram substituídos ou reparados sem que tivessem falhado.

Para uma janela de observação de 20 anos, embora o equipamento utilizado como exemplo tenha um tempo entre falhas considerado baixo quando comparado com a população de bombas da planta, a amostra é pequena. Se as análises forem realizadas por modo de falha (ou por componente) as amostras terão menos de 10 componentes.

Os registros analisados totalizaram quase 3500 registros e, a situação encontrada está resumida na Tabela 1. Vale observar que, de um total de aproximadamente 3500 registros, pouco menos da metade foi considerado correto. O restante apresentava algum tipo de problema como será explicitado a seguir.

2.4.6 Problemas encontrados nos registros de falhas

Os principais problemas encontrados nos registros de falhas foram:

a) Registros incompletos: são registros em que os dados essenciais (modo de falha, datas de início ou de fim do evento) não foram preenchidos, impossibilitando qualquer análise.

b) Registros com conflito de análise ou motivo são aqueles em que o modo de falha não está coerente com a causa básica ou com as peças substituídas.

c) Duplicidade: foram 385 eventos de duplicidade de informação. Existem cinco eventos em que a duplicidade ocorreu por erro de cadastro. As outras 380 decorrem de um período de transição durante o qual duas fontes de consulta eram mantidas atualizadas simultaneamente.

d) Registros que não configuram falhas ou estão mal atribuídos ao equipamento: praticamente 1000 registros foram considerados como não ligados a falhas ou não atribuíveis aos equipamentos onde foram alocados. Esses eventos se enquadram em alguma das seguintes categorias: (i.1) o evento ocorreu em algum elemento de tubulação fora das fronteiras definidas para o item; (i.2) o evento não afetou funções do equipamento (ex.: reparo em isolamento, pintura de identificação); (i.3) o evento não exigiu indisponibilização do equipamento (ex.: o operador achou que a temperatura do mancal estava elevada. Medidas feitas com termômetro mostraram que estava dentro do esperado ou, o operador reportou ruído e a análise mostrou que o ruído devia-se a cavitação. O problema foi sanado com

pequeno ajuste de processo).

e) Divergência de datas: entre os 385 registros de duplicidade, 167 apresentavam divergências nas datas de início e fim da falha. As causas aqui são: (e.1) problemas de apropriação dos dados (não preenchimento do formulário de confiabilidade); (e.2) falta de compreensão dos conceitos de início e fim da falha; (e.3) dificuldade em se anotar o momento exato da falha.

f) Equipamentos desativados: em 245 registros, depois de realizado boa parte do trabalho de saneamento, encontrou-se um registro informando que o equipamento fora substituído.

g) Registros apropriados no número de identificação errado: são aqueles em que a falha ocorreu no equipamento titular e este sofreu a manutenção. Por algum motivo, o texto na ordem de serviço saiu para o equipamento reserva e o analista registrou a falha no equipamento reserva.

h) Registros com tempos entre falhas muito baixos: são as intervenções com tempos entre falhas muito baixos como o exemplo citado na Figura 2. Geralmente, falhas durante montagem dos equipamentos na oficina.

i) Falta de contadores para calcular os tempos efetivos de operação.

j) Existência de registro porém sem mais evidências de ter ocorrido uma intervenção. São aqueles em que não se encontrou relatórios de manutenção, os registros aparecem no sistema de gerenciamento como não tendo sido executados, os custos apropriados são nulos e, não há registro de consumo de sobressalentes.

k) Registros de modificações ou melhorias: são intervenções realizadas por demanda da engenharia e que, não configuram falhas. Exemplo: um aumento do diâmetro do rotor para aumentar a capacidade de produção da planta. No caso do motor, com o aumento do diâmetro do rotor a potência requerida pela bomba excede a que o motor pode fornecer e, portanto o motor é substituído.

2.4.7 Regras para correção dos registros

As regras que serão discutidas nesta seção estão resumidas no Quadro 4. Estas regras foram discutidas e elaboradas no decorrer do trabalho de aproveitamento dos registros o que, não quer dizer que sejam originais. A princípio, são regras aplicáveis a qualquer banco de dados de confiabilidade.

Quadro 4 - Regras de decisão para correção de registros de confiabilidade

Problema	Ação
Registros considerados adequados	Nenhuma.
Registros de eventos que não são falhas	Eliminar.
Registros de eventos fora das fronteiras do equipamento	Eliminar.
Duplicidade de registros	Verificar qual o correto e eliminar o outro.
Registros com datas incorretas	Eventos originados pela equipe de preditiva ou por programação de manutenção preventiva, a data de início é a data de início dos serviços Eventos originados por manutenções corretivas, a data de início é a data da descoberta da falha. Datas sobrepostas, unificar os registros e utilizar a data mais cedo e a data mais tarde. Não havendo fontes de consulta, manter as datas registradas. Havendo um contador, confirmar datas verificando que o contador não pode indicar equipamento operando no intervalo de indisponibilidade.
Registros de equipamentos desativados ou substituídos	Eliminar.
Registros apropriados no equipamento errado.	Se for possível identificar o equipamento correto, fazer a correção. Não sendo possível identificar o equipamento correto, eliminar.
Registros incompletos	Completar.
Registros sem evidências de intervenções	Fazer o possível para mantê-lo. Buscar um mínimo de evidência. Na falta de um mínimo de evidência, eliminar.
Registros de modificações ou melhorias	Manter se houve substituição de componentes.
Registros com conflito interno	Manter. Buscar corrigir as informações
Registros com tempos entre falhas muito baixos	Verificando ser falha da manutenção, unificar registros utilizando a data mais cedo e mais tarde. Falhas que configuram a condição de aleatoriedade e independência devem ser objeto de registro
Tempos de operação efetiva	Havendo contador, somar os tempos Não havendo contador, verificar a política de rodízio da empresa e estimar o tempo. Não havendo informação, utilizar tempos de calendário.

a) Definição do que são registros adequados: é preciso definir claramente os critérios para aceitação de um registro como adequado. Os registros considerados adequados foram aqueles que atenderam a lista de verificação da Figura 1. Foram considerados precisos e com informações relevantes para o estudo. Isto é parte do conceito de qualidade de dados proposto por Karr, Sanil e Banks (2006). Para definir quais são os dados essenciais, antes é necessário definir que tipo de estudo será realizado. É a primeira etapa de planejamento recomendado nesta norma. Para calcular as funções de densidade de falha são necessárias: a identificação da falha, o modo de falha, as datas de início e fim de falha, a data de fim da última intervenção e os tempos de operação efetiva. Para que a engenharia de manutenção

possa adotar ações de melhoria, é necessário identificar quais componentes falharam e porque falharam. Por isso a importância do registro da causa da falha, quais componentes falharam e o tipo de serviço executado.

b) Quanto à precisão dos dados, se os dados de modo de falha, causa raiz e o tipo de intervenção estão coerentes entre si e com o tipo de equipamento, acredita-se que são corretos. As datas de início e fim da falha são confrontadas com os registros dos contadores. Não existindo contadores, faz-se um cruzamento dos modos de falha com a data em que a solicitação de serviço foi aberta e, com as datas em que as tarefas de manutenção específicas foram apropriadas. Esses dados, se a empresa utiliza um SICGM, estão disponíveis na OM. Para os registros anteriores à entrada em serviço do SICGM, a mesma verificação é realizada com as datas constantes dos relatórios de manutenção. Na falta de informações melhores e, não havendo inconsistências óbvias, as datas registradas devem ser aceitas como verdadeiras.

c) Dados não referentes a falhas ou atribuídos erroneamente ao equipamento devem ser desconsiderados. Como indicado por Bloch e Geitner (1986) o conceito de falha deve ser claramente estabelecido, de preferência por escrito. Todas as classes de equipamento devem ter suas fronteiras claramente estabelecidas e as mesmas fronteiras devem ser aplicadas ao usar os dados em análises probabilísticas (HAUPTMANN, 2011). Estas recomendações constam da ABNT (2011).

d) Duplicidade de registros. Os registros são entendidos como em duplicidade quando para um mesmo equipamento houver superposição ou coincidência de datas embora possam estar registrados modos de falhas diferentes. É tarefa do analista, identificar qual é o registro correto e eliminar os demais.

e) Divergência de datas. As datas de início de falha para solicitações de serviço provenientes de avaliações preditivas e de manutenções preventivas iniciam com o começo dos serviços de manutenção. Datas de início de falha em intervenções corretivas iniciam com a detecção da falha. Todos os eventos terminam com o teste do equipamento e a entrega formal à operação. Não pode haver equipamentos indisponíveis e os contadores registrarem o equipamento em operação. Não havendo registros duplicados ou contadores para confrontar os dados, esses devem ser aceitos como verdadeiros. Quando ocorrerem registros com datas superpostas, esses devem ser unificados e utilizar-se-á a data mais cedo e a data mais tarde de ambos os registros. Nesses casos, deve-se ainda identificar qual a causa de real origem à intervenção. Observou-se na análise dos registros existentes que durante o período em que uma única pessoa revisava os dados os erros eram menores do que nos períodos em que essa tarefa foi descentralizada.

f) Registros incompletos: realizar uma consulta às fontes primárias para tentar completar os dados faltantes. Não sendo possível, uma opção é eliminar o registro. Neste caso, recomenda-se começar a coleta a partir do primeiro registro após este evento, ignorando todo o histórico anterior. Essa recomendação baseia-se nas propriedades dos processos de contagem de Poisson conforme Ross (2014).

g) Registros com conflito de análise ou motivo: deve-se procurar encontrar o modo de falha correto. Mas os registros devem ser mantidos nos estudos.

h) Equipamentos desativados ou substituídos: a posição adotada neste trabalho foi de ignorar os registros anteriores à substituição e começar a coleta a partir da entrada em operação do novo equipamento. Este posicionamento é mais forte se o novo equipamento tem características diferentes do anterior e apresenta uma taxa de ocorrência de falhas totalmente diferente mostrando claramente que o equipamento substituído tinha algum problema intrínseco ao seu projeto ou sua montagem. Um segundo motivo para descartar os dados é que a informação referente ao equipamento desativado deixa de ter relevância. Lembrar que os dados de inventário (fabricante, modelo, potência, tipo de mancais) também devem ser atualizados. A exceção é no caso de equipamentos que são regularmente substituídos ou em que há vários equipamentos que são intercambiáveis e ocupam qualquer posição entre si. Nesses casos, recomenda-se tratar os registros como sendo sempre o mesmo equipamento.

i) Registros apropriados no número de identificação errado: a menos que ocorra uma suspeita que leve o analista a pesquisar as fontes originais, o erro não será detectado. A detecção desse tipo de erro tem de ser feita no momento da inserção no banco de dados. Esse erro vai inflar a taxa de falhas do equipamento ao qual foi erroneamente atribuído o registro. Mesmo se as falhas dos equipamentos vierem a ser agrupado, o que não é incomum para o caso de equipamentos submetidos às mesmas condições, os tempos entre falhas serão menores que o real para um equipamento e maiores para o outro.

j) Registros sem evidências de ter ocorrido uma intervenção. Manter os registros significa inflar a taxa de falhas o que é uma posição mais conservadora. Havendo uma mínima suspeita de que o registro pode ser real, sugere-se mantê-lo. Não é incomum que em equipamentos que sofrem intervenções frequentes ou em momentos de crise (um excesso não esperado de quebras) a prioridade é atribuída ao retorno dos equipamentos e os relatórios costumam ser postergados para quando houver tempo e, terminam não sendo feitos. Não havendo nenhuma evidência da intervenção, recomenda-se excluir o registro.

k) Registros com tempos entre falhas muito baixos, geralmente indicam serviços de recuperação mal executados. Recomenda-se juntá-los em uma única ocorrência gerando

uma maior indisponibilidade sem redução dos tempos médios entre falhas. No entanto, quando o equipamento permanece um longo tempo como reserva e a falha for atribuída à inatividade, deve-se manter o registro mesmo se o tempo entre falhas resultar muito pequeno.

l) Registros de modificações ou melhorias: não são problemas de confiabilidade. É interessante manter os registros históricos nos arquivos e proceder alteração do inventário. Isso porque vindo a surgir uma tendência nas taxas de falhas será fácil identificar a causa. Para os estudos de confiabilidade, esses registros não contam nos tempos entre falhas mas, se houve substituição de componentes, é um caso de censura e isso deve ser considerado na determinação da função que representa a distribuição do componente.

m) Tempos de operação efetiva: havendo um contador, não há problemas. Nos casos em que não há contador a sugestão é considerar metade do tempo de operação para cada equipamento (BARRINGER, 1996). Esta recomendação é válida desde que a empresa tenha uma política de rodízio dos equipamentos. A recomendação mostrou-se válida para o período em que o equipamento do exemplo citado nos Quadros 2 e 3 (dois equipamentos operando e um reserva) dispôs de um contador. Não havendo a política de rodízio ou, casos em que os equipamentos redundantes dificilmente são postos em operação, será necessário buscar o conhecimento dos técnicos de operação para obter uma melhor estimativa da divisão dos tempos. Não é recomendado dividir os tempos de operação meio a meio sem antes, conhecer os procedimentos operacionais da empresa.

2.4.8 Sugestões para melhorar a coleta de dados

Na seção anterior, foram desenvolvidos procedimentos para corrigir os registros existentes. Nesta seção se discute procedimentos para minimizar a ocorrência de erros ou não conformidades nos registros que, estão mostrados no Quadro 5 e são discutidos ao longo deste capítulo. Parte-se da premissa de que a estrutura do banco de dados está pronta e que, nesse banco de dados todas as recomendações de taxonomia foram atendidas e o inventário está corretamente preenchido. As questões que surgem são quanto a definição do objetivo da coleta (ABNT, 2011), a definição do que é falha (BLOCH; GEITNER, 1986; BARRINGER, 2004; BLESER; CHAME; ALVARENGA, 2013; ABNT, 2011) e, a definição das fronteiras (HAUPTMANN, 2011). Estas questões surgem naturalmente e são fundamentais para que o processo de correção do banco de dados possa prosseguir. Bloch e Geitner (1986) e Unsworth *et al.* (2011) recomendam que essas definições sejam escritas e formalizadas e, que as políticas e questões de confiabilidade venham dos níveis mais altos da companhia (BARRINGER, 2004).

Na seção anterior, item (c), a atribuição de falhas indevidas aos equipamentos, está associada a problemas de não entendimento de conceitos e também a problemas nas apropriações de dados nas fontes primárias. Para o entendimento dos conceitos envolvidos, é necessário o treinamento, dos funcionários engajados na cadeia de coleta de dados, nos conceitos de confiabilidade. A ABNT (2011) é um bom texto para esse treinamento. Quanto às fontes primárias, elas, em geral, foram criadas com outros objetivos (financeiros, indicadores de manutenção) que não confiabilidade. Cabe ao analista ou, à pessoa que está compilando os dados, observar as inconsistências nessas fontes e não transferi-las para o banco de dados de confiabilidade. A designação formal de uma pessoa para revisar os registros, diferente daquelas que fizeram a coleta, conforme recomendado por Hauptmanns (2011) reduz em muito as falhas encontradas. A observação em (e), de que, quando a administração do banco de dados era feita por uma única pessoa, ocorriam menos erros nas datações, reforça a necessidade de se designar formalmente uma pessoa como responsável pelos registros e que, esta pessoa seja diferente daquelas que coletam as informações e as inserem no banco de dados.

A existência de um “auditor” de qualidade dos registros, motivado, conhecedor dos conceitos de confiabilidade, dos equipamentos e processos da unidade fabril e dos objetivos e da importância da coleta de dados e, em uma segunda linha de verificação, (quer dizer, não diretamente envolvido na coleta), é capaz de evitar a ocorrência de registros incompletos, citados em (f) e com conflitos de informações, citados em (g).

Os registros referentes a equipamentos desativados, item (h), e os registros de modificações e melhorias, item (l), não consistem em erros no banco de dados. Como foi comentado em seções anteriores, eles são importantes como registros históricos mas alguma marcação nesses registros deve ser feita para que não sejam usados em estudos de confiabilidade. Não necessariamente o fato de haver uma linha de auditoria mas a auditoria ocorrer tão logo o registro seja inserido no banco de dados torna mais fácil a identificação da apropriação no equipamento errado, item (i), ou o registro de intervenções não existentes, item (j). Isto porque há a facilidade de confrontar os registros com a programação realizada nos períodos logo anteriores (as programações da produção e da manutenção costumam ser documentadas nas empresas e, são documentos a serem consultados pelo analista de confiabilidade). Registros com tempos entre falhas muito baixos, item (k), devem ser objeto de uma análise específica. É necessário identificar a causa da falha para definir se é uma nova falha que obedece aos critérios de que as falhas são independentes ou é uma falha inserida durante o processo de manutenção. No primeiro caso, deve ser feito novo registro de falha.

No segundo, como discutido na seção anterior, considera-se uma continuação do serviço anterior.

Quadro 5 - Sugestões para melhoria da coleta de dados x bibliografia

SUGESTÕES	AUTOR
Definições de políticas de confiabilidade tomadas nos escalões mais altos da empresa	Barringer (2004)
Procedimento com objetivos da coleta	ABNT (2011)
Procedimento escrito com conceito de falha.	Bloch e Geitner (1986)
Definição por escrito das fronteiras	Hauptmanns (2011) ABNT (2011)
Treinamento nos conceitos da NBR ISO14224.	Hauptmanns (2011) ABNT (2011)
Definir um responsável formal pelo banco de dados	Unsworth <i>et al.</i> (2011)
Controle de qualidade em três níveis ou, pelo menos, uma pessoa diferente daquela que preencheu os registros faz uma verificação dos registros	Hauptmanns (2011) ABNT (2011)
Check lists para o controle da qualidade	Sandtorv, Hokstad e Thompson (1996)
Mudar a cultura da empresa, atribuindo real importância à confiabilidade	Unsworth <i>et al.</i> (2011)
Incentivos a utilização dos dados em estudos de confiabilidades.	Barringer (2004)
Divulgar os trabalhos e resultados obtidos com os dados coletados em eventos internos (DDS, reuniões de qualidade, seminários)	Unsworth <i>et al.</i> (2011) Barringer (2004)

Os dados de confiabilidade têm sido utilizados principalmente para se obter indicadores de manutenção. O uso dos dados para análises de falhas resumem-se ao esforço isolado dos grupos de engenharia de manutenção e, à aplicação de técnicas de Pareto para identificar *bad-actors* e os tipos de falhas recorrentes. Duas colocações de Barringer (2004) são: i) é importante começar a utilizar os dados, desde as técnicas mais simples, para aprender e melhorar o uso e a coleta dos dados e, ii) que a política de confiabilidade da empresa deve vir do topo da hierarquia. É importante apresentar os resultados do estudo para toda a força de trabalho envolvida na coleta e análise de falhas, de forma que a mesma perceba a importância do registro correto dos dados (SMITH, 2011). Assim, os colaboradores deixam de perceber a coleta de dados como uma tarefa inútil e tediosa (UNSWORTH *et al.*, 2011), contribuindo na mudança da cultura da empresa.

2.5 CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivos definir regras para balizar a correção de registros já existentes em bancos de dados de confiabilidade e, emitir recomendações para aprimorar a inserção de novos registros nos bancos de dados. Para isso, foram estudados os registros existentes nos bancos de dados de confiabilidade de uma empresa do setor petrolífero. Nesta análise foram identificados os problemas existentes nos seus registros e foram propostas critérios para seu aproveitamento.

O estudo na literatura não identificou regras para tratar problemas nos registros. Talvez devido ao tratamento das não conformidades ser intuitiva ou, ser particular para cada tipo de indústria, ou ainda, depender do estilo e preferências de cada autor. Nos estudos de confiabilidade consultados, os dados necessários sempre aparecem prontos e perfeitos para o uso. Quanto à coleta dos dados, os autores reconhecem e apontam a existência de não conformidades e sugerem soluções para evitar a inserção de erros nos bancos de dados.

Para a elaboração deste artigo, foram analisados em torno de 3500 registros de falhas e identificados os tipos de não conformidades existentes naquele banco de dados. Como a quantidade de dados de falha é escassa, duas preocupações permeiam todo o trabalho: i) a precisão das informações e ii) tornar aproveitáveis o máximo de registros. Sempre com esses dois objetivos, foram propostas regras de decisão a serem aplicadas na correção dos registros existentes. Acredita-se que essas regras são válidas para qualquer banco de dados de confiabilidade, não se limitando à empresa estudada.

Por fim, são descritas recomendações que, se aceitas e colocadas em execução, evitarão que futuros registros sejam inseridos nos bancos de dados com erros ou inadequações.

2.6 REFERÊNCIAS

ABERNETHY, Robert B. *et al.* **WEIBULL ANALYSIS HANDBOOK**. West Palm Beach: U.S. Government Printing Office, 1983. 228 p. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a143100.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2016.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 610**: Chemical pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries. 10 ed. Washington DC: abril, 2004. 184 p. CD-ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14224**: Indústrias de petróleo e gás natural – Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2011. 225 p.

BARRINGER, H. Paul. **Practical reliability tools for refinery and chemical plants**. 1996. Disponível em: <http://www.barringer1.com/pdf/Prac_Rel_Tools_Refn_ChemPlt.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2016.

BARRINGER, H Paul. **Process and equipment reliability**. 2004. Disponível em: <<http://www.barringerl.com/pdf/Barringer-MARTS-Process-and-Equipment-Reliability-Paper.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2014.

BLESER, C. S.; CHAME, L. M.; ALVARENGA, T. V.. The significance of failure and repair data collection when performing reliability assessment. In: STEENBERGEN, R. D. J. M. *et al.* **Safety, reliability and risk analysis: Beyond the horizon**. Londres: Francis And Taylor Group, 2013. p. 2761-2766. Trabalhos apresentados no 22nd European Safety and Reliability (ESREL 2013) em Amsterdam.

BLOCH, Heinz P; GEITNER, Fred K. **Practical Machinery Management for Process Plants: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting**. Houston: Gulf Publishing Company, 1986. 2 p. 2 v. ISBN 0-87201-872-5.

HAMEED, Z.; VATN, J.; HEGGSET, J.. Challenges in the reliability and maintainability data collection for offshore wind turbines. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 36, n. 8, p.2154-2165, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.008>.

HAUPTMANN, Ulrich. Reliability data acquisition and evaluation in process plants. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.266-273, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2010.09.005>.

KARR, Alan F.; SANIL, Ashish P.; BANKS, David L.. Data quality: A statistical perspective. **Statistical Methodology**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.137-173, abr. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.stamet.2005.08.005>.

LAFRAIA, J. R.. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. (ISBN 978-85-730-3792-0).

LOUIT, D.M.; PASCUAL, R.; JARDINE, A.K.S.. A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 94, n. 10, p.1618-1628, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2009.04.001>.

MARCORIN, Adílson J.; ABACKERLI, Alvaro J.. Field Failure Data: an Alternative Proposal for Reliability Estimation. **Quality And Reliability Engineering International**, [s.l.], v. 22, n. 7, p.851-862, 2006. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/qre.768>.

RAUSAND, Marvin; ØIEN, Knut. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 53, n. 1, p.73-83, jul. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0951-8320\(96\)00010-5](http://dx.doi.org/10.1016/0951-8320(96)00010-5).

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. ISBN 978-85-352-3353-7.

ROSS, Sheldon. The Exponential Distribution and the Poisson Process. **Introduction To Probability Models**, [s.l.], p.277-356, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-407948-9.00005-0>.

SANDTORV, Helge A.; HOKSTAD, Per; THOMPSON, David W.. Practical experience with a data collection project: the OREDA project. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 51, n. 2, p.159-167, fev. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00113-1](http://dx.doi.org/10.1016/0951-8320(95)00113-1).

SMITH, David J. Field data collection and feedback. In: SMITH, David J. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers**. 8. ed. Oxford: Elsevier, 2011. Cap. 13. p. 205-213. (ISBN 978-0-08-096902-2).

UNSWORTH, Kerrie *et al.* Goal hierarchy: Improving asset data quality by improving motivation. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 96, n. 11, p.1474-1481, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2011.06.003>.

3 APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONFIABILIDADE NA PRIORIZAÇÃO DAS MANUTENÇÕES EM SISTEMAS COM REDUNDÂNCIAS TIPO “COLD-STANDBY”

Resumo

Este artigo tem por objetivo usar técnicas estatísticas para calcular indicadores que auxiliem na priorização das manutenções de equipamentos pertencentes a sistemas com redundâncias do tipo *cold standby* com alternância. Para atingir este objetivo, procedeu-se à análise de amostras de registros de falhas para determinar se poderiam ser representados por distribuições exponenciais, ao levantamento das curvas de densidade de falha e à construção de modelos computacionais para simular o comportamento dos sistemas através do método de Monte Carlo e o levantamento de curvas de disponibilidade *versus* os tempos para reparo dos equipamentos que compõem os sistemas. Como principais resultados, cita-se a estimativa de tempos para reparo dos componentes do sistema redundante sem perda de disponibilidade deste e um indicador derivado deste número, a ser utilizado pelos planejadores na priorização das atividades.

Palavras-chave: Confiabilidade, Tempo para reparo. Monte Carlo. *Cold standby*. Disponibilidade. Manutenção. Redundância fria.

3.1 INTRODUÇÃO

Muitos trabalhos têm sido escritos sobre a gestão dos processos de manutenção. O objetivo comum na maioria desses trabalhos é maximizar a disponibilidade e a confiabilidade dos sistemas, evitar paradas não planejadas, diminuir a frequência das falhas, melhorar a eficiência do sistema operacional e reduzir custos operacionais.

Qualquer que seja a metodologia, um ponto fundamental é o planejamento das intervenções (CALLIGARO, 2003). Planejar significa inicialmente definir o que será feito e, na sequência, quando será feito e como será feito. A priorização das tarefas em sistemas industriais é importante para reduzir a execução de atividades desnecessárias ou impróprias, especialmente quando a quantidade de solicitações supera a quantidade de recursos disponíveis. Uma boa política de priorização pode fazer com que se utilize de forma eficiente os recursos disponíveis, permitindo reduzir os custos totais de operação do sistema pela redução dos tempos de parada e da frequência de falhas, ao mesmo tempo em que viabiliza melhorias na eficiência do sistema operacional (LIN, 2008).

Usualmente, a definição quanto ao que será feito é realizada em conjunto com as áreas operacionais. O documento maior que orienta esta definição é a programação da produção. À

medida que as discussões descem ao nível operacional, o planejamento utiliza a experiência dos funcionários envolvidos. Em geral, os métodos de priorização de tarefas citados na literatura baseiam-se em regras heurísticas e no senso comum, derivado da experiência (LIN, 2008).

Uma planta industrial do tipo estudado neste trabalho é, em geral, composta de várias unidades, interligadas e interdependentes. Assim, a falta de qualquer delas interfere no funcionamento do todo. Neste tipo de planta, existem muitos equipamentos essenciais, e a falha desses equipamentos causa perdas financeiras vultosas.

Conforme Moubray (1997) ressalta, há sempre uma componente humana no processo de definição da prioridade, onde cada área procura resolver seus próprios problemas em detrimento das demais. Há que se considerar que grande parte dos funcionários acredita na falsa premissa de que as falhas ocorrem devido ao desgaste no tempo, e isto contamina o processo decisório. Enfim, há uma componente importante de subjetividade na priorização das tarefas e isso frequentemente deixa a sensação de que está se sobrevalorizando uma tarefa ou está se deixando de executar as reais prioridades.

Para contornar o problema, informes adicionais são solicitados. Um exemplo, mostrado na Figura 3, são relatórios das equipes de avaliação preditiva e as solicitações de opiniões de pessoas que não fazem parte do grupo de planejadores.

Figura 2 - Painel de acompanhamento dos equipamentos dinâmicos



Fonte: Eng. Rudimar Trarbach e TM Gilmar P. Silva.

O cenário descrito torna desejável um ferramental que suporte às decisões relativas à priorização da programação de manutenção baseada, não apenas na experiência dos participantes do processo, mas também em métodos matemáticos e estatísticos.

Neste trabalho faz-se uma análise da sensibilidade da variável disponibilidade em várias estações de trabalho em relação aos tempos de manutenção. Especificamente, estudam-se

aqueles postos compostos por dois conjuntos de equipamentos sendo, um titular (equipamento ativo) e um reserva (equipamento em *standby*).

Como é prática da empresa que é objeto de estudo neste trabalho, semanalmente os equipamentos têm sua condição invertida. O equipamento que estava na reserva passa a ser o titular e o primeiro passa para a condição de reserva. Este tipo de arranjo é encontrado na literatura com o nome, traduzido livremente do inglês, de sistemas com reserva e com alternância (*alternating cold standby*) em estudos realizados por Mokkadis, Tawfek e Elhssia (1997), Goel, Tyagi e Gupta (1992) e Murari e Maruthachalam (1982). Como também é comum na literatura (LEUNG; ZHANG; LAI, 2011 e KAYA; PERVANE; DEMIRHAN, 2012), considera-se que o instrumento que faz a troca entre os equipamentos, não falha.

A proposta deste artigo é oferecer dados adicionais aos tomadores de decisão ao informar quanto tempo é possível levar para executar uma determinada manutenção sem que isto incorra em perdas de produção e apontando, sob este ponto de vista, qual equipamento é prioritário. Também pretende responder à questão frequentemente colocada de quanto tempo um determinado equipamento pode aguardar para ser reparado. O desconhecimento dessas respostas traz ansiedade às áreas operacionais. Esta ansiedade se mostra na cobrança de prazos sempre menores, no aumento nas quantidades de sobressalentes estocados e no impacto dos custos de horas extras.

Defende-se que uma análise baseada em estudos estatísticos e, de preferência com registros de confiabilidade da própria planta, fornece suporte para permitir maior assertividade no processo decisório. Como etapas do trabalho, necessárias para alcançar o objeto principal seguiu-se o seguinte processo: (i) tratamento dos dados de falhas, visto no capítulo 2; (ii) obtenção das distribuições de falhas dos equipamentos e sistemas; (iii) modelagem dos sistemas, inclusive com a elaboração de rotinas de programação uma vez que análises de confiabilidade por serem processos estocásticos, dificilmente são solucionadas com o uso de métodos exatos.

Este artigo está organizado em cinco seções. Após esta introdução, a seção 3.2 apresenta um referencial teórico abordando: a) questões de gerenciamento das prioridades; b) os testes estatísticos para agrupar dados de diferentes equipamentos; c) testes para certificar que os equipamentos em análise estão submetidos a distribuições exponenciais; d) modelagem do sistema em *cold standby* com alternância. A seção 3.3 apresenta o método de trabalho onde é explicado como foi realizado o tratamento dos dados e são explicitadas as análises realizadas, a determinação dos principais modos de falha e a lógica da simulação. A seção 3.4 apresenta os resultados obtidos ao se analisar a sensibilidade das várias estações de trabalho aos tempos

de reparo e, por fim, a seção 3.5 apresenta as conclusões do estudo.

3.2 REFERENCIAL TEÓRICO

Como o estudo compreende várias fases, considerou-se melhor tratá-las separadamente. Este capítulo, referencial teórico, está dividido em três partes correspondentes à gestão da manutenção, às análises estatísticas e à modelagem dos sistemas.

3.2.1 A gestão da manutenção

Marquéz *et al.* (2009) colocam que existem inúmeras técnicas que tentam oferecer uma sistemática para definir quais ativos devem ser priorizados em um processo de gestão de manutenção. Esses autores, citando Moubray (1997), dizem que a maior parte das técnicas quantitativas utiliza alguma variação do conceito conhecido por PRN (número de probabilidade x risco). Conforme a prática, os equipamentos com PRN mais elevado são priorizados. Em uma avaliação profissional do risco, este é calculado multiplicando a frequência esperada de ocorrência com o impacto causado pela mesma. Quando não há dados para dar suporte quanto a taxas de falhas históricas, pode-se utilizar o conhecimento dos funcionários para obter uma avaliação da prioridade dos ativos e, nestes casos, métodos qualitativos podem ser utilizados. Moubray (1997) apresenta o sequenciamento que deve ser seguido para se obter uma priorização das ações seguindo esta metodologia.

Barringer (1996) faz duas afirmações relevantes. A primeira, que os estudos de confiabilidade servem para subsidiar o processo de tomada de decisões cujo objetivo é aumentar a produtividade do sistema, atingindo o objetivo final que é aumentar o faturamento. Isso remete a Saaty (1990) e ao processo analítico hierárquico (*analytical hierarchy process*, AHP), que é diferente dos métodos baseados em PRN. Esse autor faz uma discussão sobre o processo de construir uma hierarquia. Inicia com a representação do modelo tão precisa quanto possível sem, no entanto, perder a sensibilidade aos elementos de mudança, considerar o ambiente que cerca o problema, identificar os atributos que contribuem para a solução e identificar os participantes associados com o problema. O autor afirma que uma das tarefas mais criativas no processo de decisão é definir quais fatores são importantes à decisão. Na formação da matriz de decisões o autor sugere escalas absolutas e relativas. Pois o critério apresentado ao final deste trabalho pode ser inserido em uma matriz AHP. A disponibilidade é um fator importante, e o resultado é uma escala absoluta. A segunda afirmativa é que, a menos que grandes esforços sejam feitos para implementar melhorias que baixem as taxas de falhas, o número de falhas futuras em geral segue o histórico de falhas assim como os tempos futuros para reparos e processos de partida das plantas. Entende-se por esta afirmativa que as

distribuições calculadas se mantenham estáveis por um longo período, podendo se utilizar as curvas calculadas e apresentadas ao final do trabalho por um período razoável de tempo.

Uma questão tentadora, uma vez que o tempo médio entre falha (TMEF) é o inverso da taxa de falha nas distribuições exponenciais e, neste trabalho, todas as distribuições são consideradas exponenciais, é simplesmente colocar os TMEF em ordem crescente e priorizar nesta ordem, do menor para o maior. No entanto, Moubray (1997) afirma que este conceito não se presta a isto e aponta que o TMEF tem usos muito específicos, como estabelecer a frequência de busca de falha oculta, definir se as tarefas planejadas necessitam realmente ser feitas, ajudar a definir a disponibilidade desejada de um sistema de proteção, levantar justificativas técnico-econômicas para programar modificações e avaliar a efetividade global da manutenção.

3.2.2 Análise estatística

Calixto (2013) informa que as análises de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade (RAM, do nome em inglês, *reliability, availability and maintainability*) permitem quantitativamente definir: (a) disponibilidade e confiabilidade dos sistemas; (b) impacto de políticas de estoque na confiabilidade dos sistemas; (c) impacto das políticas de manutenção na confiabilidade; (d) impacto da logística na confiabilidade; (e) impacto das redundâncias sobre a confiabilidade dos sistemas. O autor coloca que uma análise RAM, metodologicamente, pode ser dividida em três frentes: análise dos dados de falha e reparo, modelagem e simulações.

O uso de dados de falhas e reparos é crucial para definir as curvas de probabilidade de falha (cpf) e curvas de falhas acumuladas (cfa) dos equipamentos ou componentes (LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009). Embora a literatura informe que a melhor representação da planta em estudo seja obtida com uso de dados das próprias instalações, um dos problemas ao se proceder desta forma é a falta ou escassez destes. Os autores, citando um debatedor no trabalho de Ansell e Phillips (1989), comentam que a escassez de dados é um problema que jamais desaparecerá, uma vez que o objetivo da manutenção é tornar os eventos de falha raros. Assim, pode-se esperar que, conforme a manutenção melhora, os eventos de falhas diminuam. Para trabalhar com amostras pequenas os autores sugerem o uso de combinação de dados e, para amostras ainda menores, uma abordagem bayesiana. Essa forma de análise é considerada o estado da arte no tratamento de dados (HAUPTMANN, 2011) e seu uso é disseminado na literatura consultada. Estimativas bayesianas consistem em uma alternativa aos métodos clássicos de determinação de um estimador de uma distribuição quando existem

poucos ou mesmo nenhum registro para se utilizar. Os métodos clássicos utilizam a equação (4) ou o método dos mínimos quadrados. Porém, quando a quantidade de falhas é nula ou as amostras são muito pequenas, os métodos clássicos falham. Nestes casos recomenda-se a utilização de metodologias que tratam de distribuições ditas não informativas. A partir destas distribuições *a priori*, faz-se a estimativa para as distribuições *à posterior* através da equação (ABNT, 2011):

$$\lambda = \frac{(2n+1)}{2t} \quad (1)$$

Onde n é número de falhas e t é o tempo de operação do equipamento.

Combinar dados consiste em utilizar dados de vários equipamentos similares como se fossem de uma única amostra para constituir uma amostra maior (HAMEED; VATN; HEGGSET, 2011). Estes autores alertam que este agrupamento não pode ser feito de qualquer forma e que as populações precisam ser similares e, fazem uma explanação sobre o que significa essa similaridade e discutem sobre a homogeneidade das amostras. Finalmente, recomendam que as amostras sejam testadas estatisticamente antes do agrupamento dos dados de falha. Balaban (2009) apresenta um teste para verificar se conjuntos de duas amostras podem ser considerados similares ou provenientes de uma mesma população. O teste, detalhadamente descrito por este autor, é um teste estatístico não paramétrico denominado Mann-Whitney. Este teste foi apresentado primeiramente por Conover (1999). Este autor apresenta outro teste não paramétrico de interesse, Kruskal-Wallis, para ser aplicado para verificar se múltiplas amostras podem ser consideradas provenientes de uma mesma população. Os testes consistem em transformar as informações das populações em números de ordenamento. A seguir estes números são inseridos em equações que vão resultar em quantidades que devem ser comparadas com intervalos obtidos a partir dos valores críticos de uma curva normal ou qui-quadrado. Se o valor obtido estiver no intervalo estabelecido, a hipótese nula, de que as amostras são similares, é aceita.

Sendo a confiabilidade uma função probabilística é necessária a utilização de distribuições de probabilidade para que se possa fazer um estudo quantitativo. As mais utilizadas em estudos de confiabilidade são: normal, exponencial, lognormal e Weibull (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Balaban (2009) apresenta uma discussão sobre processos com reparos que retornam o produto à condição de novo e cujos processos de falha são independentes da idade, desenvolve matematicamente a demonstração de que esses processos

são bem representados por distribuições exponenciais.

A utilização da distribuição exponencial em estudos de confiabilidade é amplamente difundida, principalmente pela simplicidade matemática associada a ela. As Equações 2 e 3 determinam as representações de confiabilidade para $t \geq 0$ sendo, $f(t)$ a função de densidade, $R(t)$ a função de confiabilidade e, onde λ é a taxa de falha. O cálculo para λ , por sua vez, é representado pela equação 4, onde n é o número unidades em teste, r é o número de unidades que falharam, t_i é o tempo até a falha e t_i^+ o tempo de censura da unidade i (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{r}{\sum_{i=1}^r t_i + \sum_{i=1}^{n-r} t_i^+} \quad (4)$$

Importantes propriedades da distribuição exponencial apresentadas por Fogliatto e Ribeiro (2009) determinam que: (i) em qualquer período do tempo, é considerada a mesma taxa de falha, (ii) a função exponencial não tem memória. Ross (2014) demonstra estas propriedades e apresenta um exemplo que deixa claro o que significa a ausência de memória ao perguntar qual a probabilidade deste equipamento operar por 5 minutos, cuja resposta é que a probabilidade seria $e^{-\lambda \cdot 5}$. Uma segunda questão, referente ao mesmo equipamento, pergunta qual a probabilidade do equipamento, já tendo operado 10 minutos, vir a operar por mais 5 minutos. A resposta a esta questão também é $e^{-\lambda \cdot 5}$. Estas duas premissas restringem a utilização da distribuição exponencial a quando a ocorrência de falhas for relativamente constante, como é o caso de unidades durante seu período de vida útil e, onde as causas de falha não sejam atribuídas a mecanismos de desgaste ou outro, associado ao tempo de uso das unidades. Se as taxas de falha são constantes, muito provavelmente a distribuição exponencial é adequada para representar o sistema (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). O autor ainda apresenta uma discussão sobre testes para verificar a aderência da amostra à distribuição selecionada. Cita métodos gráficos, também apresentados por Balaban (2009) e testes analíticos. Dentre estes, explora em detalhes o teste do qui-quadrado. Para pequenas amostras, como é o caso neste estudo, há a informação de que o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) é o mais adequado.

Uma vez coletados e analisados os dados de falhas, a distribuição que melhor representa estes dados pode ser obtida. Para tanto, é necessário estimar os parâmetros da respectiva distribuição de probabilidade. Selecionada a distribuição apropriada para modelar cada componente de um equipamento, ou equipamento de um sistema, se usa diagramas de blocos

funcionais para obter a confiabilidade dos sistemas mais complexos, compostos por estes componentes e equipamentos (JARDINE; BUZACOTT, 1985). A técnica de uso de diagramas de blocos é conhecida dos estudiosos de confiabilidade e há vasta literatura tratando do assunto. Maiores detalhes podem ser vistos, por exemplo, em Fogliatto e Ribeiro (2009).

Jardine e Buzacott (1985) recomendam que a análise da confiabilidade dos equipamentos seja feita a partir da análise da confiabilidade dos componentes e, nestes, seja dividida por modos de falha. A ABNT (2011) orienta como se deve proceder. Ambas as referências não descartam que, em casos de falhas muito esparsas ou mesmo ausência de informações, a análise do equipamento seja feita de uma forma mais geral, sem descer ao nível dos componentes. Porém, colocam que a vantagem de descer ao nível dos componentes é que isso vai permitir, em análises posteriores, identificar qual o componente mais fraco e direcionar a ele as ações de melhoria.

Quanto ao conceito de Disponibilidade, existem várias expressões matemáticas para defini-lo (ABNT, 2011). Neste estudo interessa o conceito de disponibilidade intrínseca apresentado na norma e que resulta da relação entre o tempo médio operacional e a soma deste com o tempo médio para reparos.

3.2.3 Modelagem de sistemas redundantes

Para aumentar a confiabilidade dos sistemas pode se usar o recurso de redundâncias. Smith (2011) apresenta brevemente os tipos de redundância existentes e traz um formulário para definir as taxas de falhas em sistemas com $m \times n$ redundâncias (k out n) usando como premissa que todos os componentes têm as mesmas taxas de falhas. Conforme o autor, as configurações redundantes dividem-se entre as configurações ativas e aquelas em *standby*. As configurações ativas podem ser totais, parciais ou condicionais. Quanto àquelas em *standby*, este autor menciona que podem ser para unidades iguais ou diferentes. Estas configurações em *standby* serão discutidas adiante.

Na análise de sistemas reparáveis, uma variável que adquire importância é o tempo médio para reparo (TMPR). Smith (2011) apresenta conceitos relevantes. Primeiro o autor faz uma breve demonstração e conclui que a taxa de falhas de um sistema reparável em *cold standby* pode ser estimada como:

$$\text{Taxa de falhas do sistema} = 2 \cdot \lambda^2 \cdot (\text{TMPR}_1 + \text{TMPR}_2) \quad (5)$$

quando os parâmetros de forma são iguais, ou como:

$$\text{Taxa de falhas} = 2.\lambda_1.\lambda_2 . (\text{TMPR}_1 + \text{TMPR}_2) \quad (6)$$

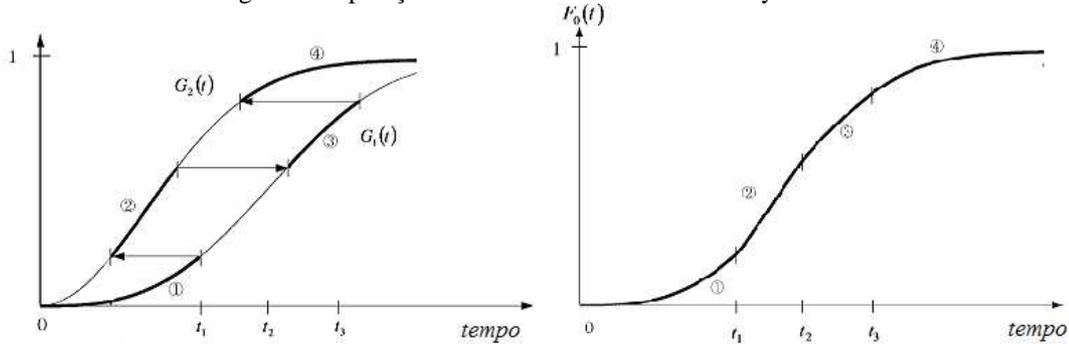
quando os parâmetros são diferentes. Considera-se relevante o fato de que os tempos para reparo (TPR) adquirem importância na definição das taxas de falhas e disponibilidades dos sistemas. O autor ainda faz uma discussão quanto a diferenciação entre o tempo efetivo para reparo e o tempo de indisponibilidade. O TMPR inclui todo o tempo decorrido desde que a falha tornou-se aparente até o momento em que o equipamento é alinhado ao sistema e volta à linha de produção (inclui diagnóstico, planejamento da intervenção, busca de sobressalentes, tempo reparo em si, verificações para ter certeza de que o reparo foi bem sucedido até o alinhamento e disponibilização para a operação). Finalmente, alerta que os tempos para reparos são variáveis e, muitas vezes, seguem uma distribuição lognormal.

Sistemas *cold standby* em sistemas reparáveis são estudados no trabalho desenvolvido por Coccozza-Thivent (2007). Os estudos desenvolvidos por este autor consideram que um dos equipamentos é o titular (ativo) e o segundo é o *standby*. Estes estudos mostram que, como a cada troca de equipamento titular o sistema adquire a curva de falhas deste equipamento, isto gera descontinuidades na curva de probabilidade acumulada do sistema. Em função disto, a aplicação de uma distribuição exponencial, não oferece resultados corretos. A partir daí, é realizado um complexo e trabalhoso desenvolvimento matemático para, como resultado final, obter o tempo de disponibilidade do sistema.

As redundâncias do tipo *cold standby* permitem variações que dependem da política de operação dos ativos. Alguns especialistas acreditam que alternar os equipamentos A e B de tempos em tempos é melhor para a confiabilidade do sistema. Outros acreditam que manter o conjunto A operando e ligar o conjunto B apenas eventualmente para verificar se está em condições de substituir o conjunto A é mais confiável (CALIXTO,2013). A prática da unidade que é objeto de estudo neste trabalho tem demonstrado que manter um conjunto parado por muito tempo é prejudicial aos equipamentos. Nesta unidade, adota-se uma política de alternância dos conjuntos, não havendo a priorização de um deles. Esse tipo de operação é representado na Figura 4, onde as linhas em negrito representam o tempo em que ou o equipamento A ou o equipamento B estão operando. As setas horizontais indicam que, até o tempo t_1 o equipamento A está operando e, o sistema, como pode ser visto no diagrama da direita, assume a curva de probabilidade acumulada de $G_1(t)$. Em t_1 , o equipamento A é parado e o equipamento B é ligado, o que é mostrado pela seta horizontal indicando para onde

vai a titularidade do sistema. Entre t_1 e t_2 , o equipamento B opera e, o sistema adquire a forma da curva de probabilidade acumulada $G_2(t)$. Em t_2 , o equipamento B é parado e o equipamento A volta a ser ligado, como mostra o sentido da seta horizontal. E, assim prossegue-se. A cada troca, há uma descontinuidade na curva $F_0(t)$ do sistema, mostrada no gráfico da direita.

Figura 3 - Operação de um sistema em cold standby com alternância



Fonte: Adaptação de Seo, Jang e Bai (2003)

Modelagens analíticas de situações de *cold standby* com os equipamentos A e B operando alternadamente podem ser encontradas em Mokkadis, Tawfek e Elhssia (1997), Goel, Tyagi e Gupta (1992) e Murari e Maruthachalam (1982). Este tipo de sistema, na sua forma mais simples (apenas dois conjuntos), apresenta quatro estados possíveis: (i) conjunto A e B disponíveis, podendo operar com A ou com B; (ii) conjunto A indisponível e o conjunto B operando, (iii) conjunto A operando e B indisponível e, (iii) os dois conjuntos indisponíveis. O comportamento das falhas deste tipo de sistema resulta não exponencial, embora todos os componentes do sistema sejam considerados exponenciais. Os autores, então, desenvolvem artifícios para que possam realizar os estudos dos sistemas através de cadeias de Markov ou processos semi-Markovianos. Esses trabalhos já não procuram a confiabilidade dos sistemas, mas o cálculo do tempo médio entre falhas no primeiro e no terceiro e a disponibilidade no segundo. Os modelos analíticos resultantes são de difícil adequação aos sistemas e situações objetos deste estudo devido tanto à sofisticação matemática envolvida, quanto à dificuldade em obter os dados necessários e ao esforço computacional envolvido o que, leva à inviabilidade desta solução. Estes problemas foram apontados por Seo, Jang e Bai (2003) e em uma crítica por Scarf (1997), onde afirmam que os modelos matemáticos são uma área da estatística e da matemática aplicada muito específicos para cada situação modelada e que, devido à complexidade dos modelos propostos há dificuldade para obter os dados requeridos em cada modelagem, não sendo aplicáveis em casos práticos.

Uma alternativa à análise matemática dos sistemas reparáveis, com *cold standby*, é a utilização de simulações. Especificamente, um método de análise estatística conhecido como

Método de Monte Carlo. Kaya, Pervane e Demirhan (2012) mencionam que, em pesquisas anteriores, os métodos de simulação mostraram resultados que concordam com os métodos matemáticos. Os autores explicam que, nas simulações, a predição probabilística é obtida pelo uso de números aleatórios gerados a partir de distribuições probabilísticas, as quais são utilizadas para substituir os tempos de operação e os tempos de reparo. A avaliação probabilística torna-se necessária, porque os tempos de falhas dos equipamentos em geral são randômicos. Quando se investiga a disponibilidade de um dispositivo por um período limitado de tempo, é esperado que esse dispositivo falhe algumas vezes e seja reparado para operar por mais um tempo. Assim, números aleatórios de uma determinada distribuição são gerados algumas vezes, até que se alcance o tempo limite estipulado.

Para o desenvolvimento do modelo discutido neste artigo, foram seguidos os passos apresentados por Alexander (2003), que envolvem: i) geração de um número aleatório; ii) aplicação desse número na função inversa da função densidade de falhas (método de transformação inversa) para obtenção de um tempo até a falha. A função densidade de falhas é dada pela equação (1). $f(t)$ é substituída pelo número aleatório gerado em (i) e, em seguida, isola-se a variável t (que vai ser o tempo até a falha) obtendo-se a equação:

$$TTF = -\frac{\ln(1-rnd)}{\lambda} \quad (7)$$

Onde TTF é o tempo até a falha dos componentes ou equipamento em análise, Rnd é o número aleatório gerado pelo software em uso e λ é taxa de falha do componente ou equipamentos em análise; iii) Na sequência, os tempos de operação dos equipamentos vão sendo acumulados até que igualem o TTF calculado no passo anterior quando, o equipamento é considerado em condição de falha; iv) soma-se o tempo para reparo ao TTF e, obtêm-se a data de retorno do equipamento à condição de disponibilidade e; v) repetição do processo com geração de novo TTF.

3.3 METODOLOGIA

O presente trabalho é um estudo exploratório nos seus objetivos, conforme definido por Gil (2002) e, como método, utiliza um estudo de campo (YIN, 2001) realizado a partir de dados coletados em uma empresa do setor de petróleo. O período de observação ocorreu entre os anos de 1994 e 2014. As etapas executadas para o estudo estão apresentadas na sequência.

3.3.1 Definição do objeto

No estudo dos sistemas de bombeio e compressão da fábrica em análise foram encontrados os seguintes tipos de redundâncias em uso: a) Sistemas do tipo *cold standby* com alternância, aplicados na maioria dos sistemas de bombeio e nos compressores alternativos; b) Sistemas do tipo simples *cold standby*, aplicados somente em bombas dos sistemas auxiliares de máquinas mais sofisticadas; c) Sistemas com arranjo paralelo, em postos de bombeio em que, um único conjunto passou a ser insuficiente para atender a necessidade de produção; c) Sistemas do tipo *hot standby*, em aplicações extremamente críticas para o processo. Ambos acionadores permanecem sempre em operação embora apenas um esteja exercendo a função de movimentar o equipamento acionado e; d) Sistemas com arranjos do tipo $k \times n$. No caso, cinco conjuntos dos quais dois são necessários para manter o sistema operando. Não há prioridade de operação e há alternância periódica.

Visualizando a unidade a partir dos equipamentos acionados (bombas, ventiladores, compressores), há cerca de 1000 equipamentos. A distribuição, conforme o arranjo de operação segue a distribuição mostrada na Tabela 2.

Em função da maioria de equipamentos operar com o arranjo do tipo *cold standby* com alternância, é fácil de compreender que é entre estes sistemas que normalmente surgem os conflitos de prioridade. Portanto, o estudo deste tipo de sistema tornou-se o objeto desta pesquisa.

Tabela 2 - Quantidade de equipamentos versus tipos de arranjos

Arranjo	quantidades
Cold standby com alternância	87,6%
K de n (2 de 3)	3,4%
Simple cold standby	2,2%
paralelo	1,4%
Hot standby	0,6%
K de n (2 de 5)	0,5%
Outros	4,3%

3.3.2 Tratamento dos dados de falha

Os dados de falha dos equipamentos de interesse foram obtidos através de filtros aplicados nos bancos de dados de falha da empresa. Como é comum nas análises de confiabilidade (ABNT, 2011 e HAMEED; VATN; HEGGSET, 2011), estes dados foram

analisados manualmente de forma a: certificar que as causas de falha estavam corretamente apontadas, identificar as datas de início de falha e retorno de manutenção e o tempo de efetiva operação dos equipamentos. Conforme Jardine e Buzacott (1985), onde possível as análises de causa de falha foram levadas até o nível de componente. De posse destes dados, com uso de planilhas eletrônicas, foram calculados os tempos entre falhas (TEF) e identificados os modos de falha relevantes para cada equipamento. Como citado em 3.2.2, as distribuições foram assumidas como sendo exponenciais. Isso foi feito porque os modos de falha e a política de manutenção indicavam que estes eram casos de processos de reparo e independentes da idade. Em todas as amostras, foram realizados testes para verificar se uma função exponencial poderia se aceita para representar sua distribuição e, em todas as amostras esta hipótese (H_0) foi aceita.

Como citado com frequência na literatura (HAMEED; VATN; HEGGSET, 2011 e JARDINE; BUZACOTT, 1985), é comum a existência de poucas falhas por componentes e muitos dados censurados. Neste estudo, as censuras observadas decorrem da substituição de componentes, por necessidade para acessar o componente em falha ou, devido a crença de que os itens falham devido ao tempo de operação. Devido às falhas serem esparsas, para se conseguir mais dados para obter parâmetros de falhas mais precisos, foi utilizado o agrupamento de dados sempre que possível. Para realizar o agrupamento, as seguintes considerações foram feitas, apoiadas na observação dos dados existentes:

a) As bombas centrífugas foram agrupados duas a duas, sempre mantendo juntas as bombas A e B de um mesmo sistema . Devido às particularidades de cada sistema de bombeamento, aos pontos de operação, a forma como cada bomba é operada e, principalmente, à interação entre cada bomba e o fluido de processo que bombeia e a interferência das tubulações e temperaturas, não foi sequer considerada a possibilidade de se agrupar equipamentos pertencentes a sistemas de bombeio diversos. Os testes de similaridade aplicados demonstraram que, mesmo para estas situações em que se considerou a possibilidade de agrupamento, não é raro que a hipótese de que as amostras são similares seja rejeitada.

b) Os motores elétricos foram divididos em motores com rolamentos, lubrificados a graxa e de baixa tensão e motores com mancais de deslizamento, lubrificados a óleo e de média tensão (não houve a separação por fabricante, uma vez que as características construtivas são muito similares). Uma subdivisão decorre do projeto dos sistemas de proteção. Nas unidades mais antigas usa-se um sistema de proteção por fusíveis e nas unidades mais modernas, a proteção é feita por disjuntores. Como os motores elétricos estão

sujeitos apenas a variações de torque, fez-se um grande agrupamento com todos os motores analisados e que se encaixam em cada um dos grupos definidos.

c) As turbinas a vapor foram analisadas individualmente. Como os esforços a que estão submetidas são similares aos motores elétricos, apenas variação do torque, tentou-se agrupá-las por fabricante, mas há detalhes importantes de projeto de cada unidade que tornaram o agrupamento inviável.

d) Nas amostras, obedecendo as considerações de (a) até (c), foram aplicados os testes estatísticos apresentados e detalhados por Conover (1999). No caso dos equipamentos acionados, testes de Mann-Whitney para duas amostras e, no caso de motores elétricos, teste de Kruskal-Wallis para múltiplas amostras, de forma a garantir a similaridade destas. O agrupamento é realizado quando os testes apontam para a não rejeição da hipótese de que as amostras são similares.

3.3.3 Cálculo das taxas de falha dos equipamentos e componentes

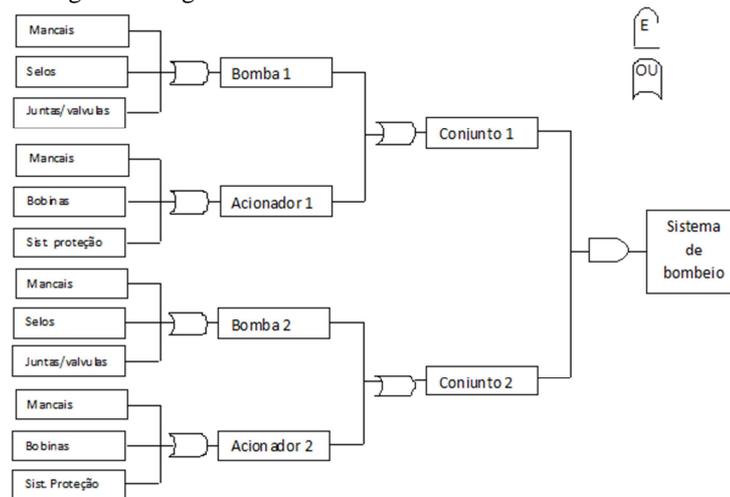
Com uso do software ProConf, foram realizados os testes de aderência para garantir que os dados, estatisticamente, podem ser representados por uma distribuição exponencial. Aceita a hipótese da distribuição exponencial, no mesmo software foram obtidos os parâmetros das diversas distribuições de cada equipamento e respectivos componentes, conforme a disponibilidade dos dados de confiabilidade.

Nos casos em que existem três registros de falha ou menos a quantidade de informações é considerada insuficiente para utilizar métodos numéricos na obtenção dos parâmetros. Nestas situações obtiveram-se o parâmetro de forma através do uso de estimativas bayesianas, utilizando a equação (1).

3.3.4 Modelagem dos sistemas com uso de diagrama de blocos

A modelagem de um conjunto de bombeio ou compressão pode ser representada na forma da Figura 5. Os modos de falha identificados foram associados aos componentes (mancais, selos, acoplamentos e juntas de vedação) que formam uma bomba. O arranjo é serial, uma vez que, na falha de qualquer dos componentes, a bomba passa ao estado de falha. Os componentes do equipamento acionador (turbinas a vapor ou motores elétricos) também são um arranjo serial. Por sua vez, os equipamentos bomba e motor vão compor um conjunto de trabalho. A bomba e o seu acionador também são um arranjo serial uma vez que a falha de qualquer dos dois torna o conjunto indisponível.

Figura 4 Diagrama de blocos de um sistema de bombeamento



Neste trabalho, os limites de fronteira dos equipamentos foram aqueles ditados na ABNT (2011). Por serem componentes que vão compor um arranjo em série, excepcionalmente os filtros de sucção, quando houve histórico relevante de falhas, foram incluídos como componentes da bomba. Componentes de tubulações como válvulas não foram considerados por não haver registros de falhas.

Devido às poucas ocorrências de falhas individuais, as falhas de motores elétricos e turbinas foram consideradas somente até o nível de equipamento e, nestes casos, as falhas devido a elementos de proteção foram incluídas como falhas dos equipamentos.

Para se chegar à confiabilidade de cada conjunto de bombeio da Figura 6, que constituem conjuntos de componentes em série (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009), a confiabilidade do conjunto é obtida pela multiplicação da confiabilidade da bomba e do motor que, por sua vez, é dada pelo produto da confiabilidade de seus componentes. Na forma final chega-se a:

$$R_{sist(t)} = R_{1(t)} \times R_{2(t)} \times R_{3(t)} \dots \times R_{n(t)} \quad (8)$$

As funções de densidades de falhas são informadas por Manzini (2010):

$$f_{sist(t)} = \sum_{i=1}^n f_{i(t)} \times \left(\prod_{j \neq i} R_{j(t)} \right) \quad (9)$$

Para os sistemas em pauta, a função densidade de falha toma a forma:

$$\begin{aligned}
f_{sist}(t) = & \\
& \lambda_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot [e^{-\lambda_2 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_3 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_n \cdot t_n}] + \\
& \lambda_2 e^{-\lambda_2 \cdot t} \cdot [e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_3 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_n \cdot t_n}] + \dots + \lambda_n e^{-\lambda_n \cdot t} \cdot [e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_{(n-1)} \cdot t}] \quad (10)
\end{aligned}$$

3.3.5 Identificação dos modelos mais adequados para representar os diferentes sistemas em estudo

Como apontado por Scarf (1997), há inúmeros modelos analíticos na literatura, mas não se encontra uma modelagem exata para os casos de alternância e os modelos são de difícil utilização. Em função disto, optou-se pelo uso de simulações. Estas simulações utilizam o método de Monte Carlo e os resultados obtidos são os tempos médios de falha e a disponibilidade dos sistemas. Baseados nos algoritmos desenvolvidos por Seo, Jang e Bai (2003) e Kaya, Pervane e Demirhan (2012), desenvolveu-se uma rotina de programação para simular a operação dos equipamentos ao longo do tempo. As premissas adotadas neste simulador e cuja alteração pode modificar significativamente os resultados são de que: i) o equipamento em *standby* e os sistemas que fazem a troca de um para outro não falham, o que está de acordo com a literatura consultada; ii) o sistema sempre parte na condição de que os dois conjuntos estão disponíveis e, sempre parte com o conjunto A operando. Havendo interesse em conhecer uma possível hipótese de o conjunto B iniciar operando é necessário pôr na rotina desenvolvida os parâmetros de B como se fossem A e, vice-versa; iii) os tempos de reparos foram considerados fixos. Jaarversk (2011) faz a transformação de variáveis estocásticas em determinísticas como uma forma de simplificar um modelo, obter uma aproximação rápida e obter um ponto de partida para um processo iterativo; iv) os sistemas não estão submetidos a rotinas de manutenção pré-definidas (preventivas) e, os únicos estados considerados foram os equipamentos estando em falha ou disponíveis. Neste trabalho somente se trata de falhas aparentes.

3.3.6 Modelo de simulador para o cálculo da disponibilidade do sistema

As principais considerações a partir das quais foi criado o programa estão descritas na Seção 3.3.5. O programa foi escrito pelo autor do artigo em linguagem Basic, utilizando o compilador Freebasic. Na Figura 6, a estrutura do algoritmo é apresentada de forma explicitada.

São inseridas as informações TRUN, número de vezes que o programa vai repetir o processo; STIME, o número de horas para o qual vai se computar a disponibilidade do sistema; SINTVAL, o intervalo em que ocorre o rodízio de titularidade e que, embora seja

possível alterá-lo, neste trabalho foi considerado fixo e igual há 168 horas; CTIME, um contador de tempo de operação (disponível + indisponível), TEMPO1 e TEMPO2 contadores de tempo de operação dos conjuntos 1 e 2. Embora a função exponencial não tenha memória e, cada vez que um conjunto falha estas duas variáveis são zeradas e novo tempo até a falha é gerado para ambos os conjuntos, fez-se necessário contadores para cada conjunto. Embora a alternância ocorra, a princípio, a cada intervalo SINTVAL, quando o *standby* não está disponível o equipamento titular no momento, acumula mais tempo de operação, de forma que, não é possível simplesmente multiplicar o TTF por dois.

Um número randômico para cada componente é gerado através da função específica do software e, por transformação inversa, cuja curva exponencial é ajustada através dos parâmetros de forma calculados a partir dos dados fornecidos pelo engenheiro de manutenção, obtêm-se os tempos até a falha (TTF1 ou TTF2) de cada componente. Como cada conjunto é um arranjo serial, considera-se que o primeiro componente a falhar causa a falha de todo o conjunto.

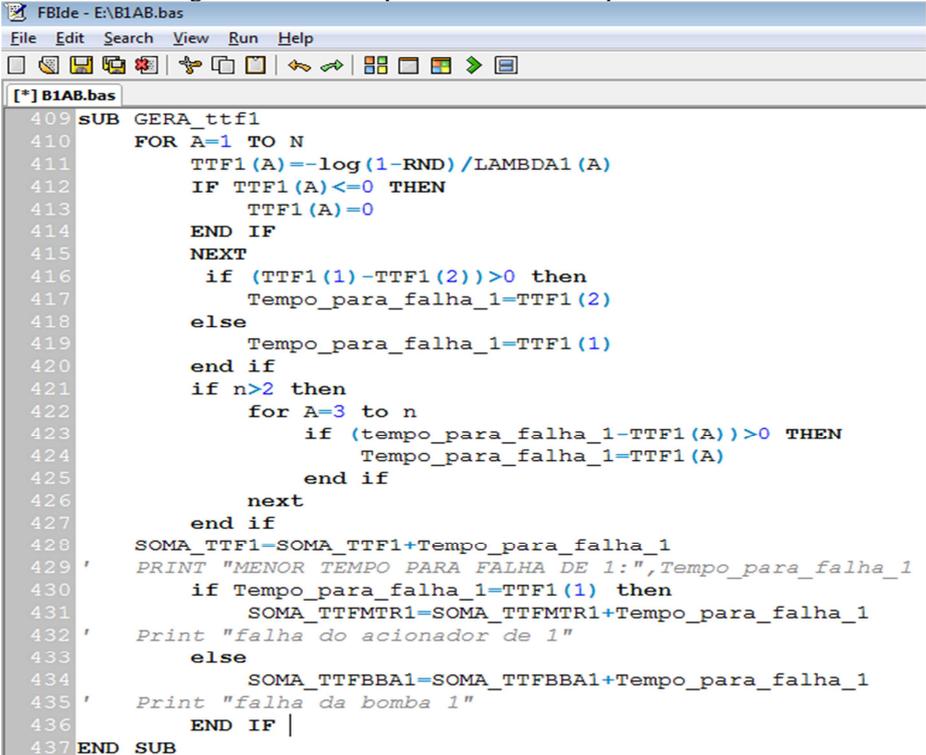
Sempre que um tempo SINTVAL é atingido, é feito um teste para verificar se o *standby* está disponível. Estando disponível, é feita a troca e adiciona-se uma porção SINTVAL à TEMPO1 ou TEMPO2 e à CTIME.

O *standby* pode não estar disponível, porque, após um evento de falha, há um tempo, TEMPOMAN, para o conjunto retornar à condição de disponibilidade. O evento de falha acontece quando TEMPO1 ou TEMPO2 iguala o respectivo TTF. É uma possibilidade o equipamento titular atingir um TTF neste período uma vez que ele segue acumulando tempos SINTVAL. No caso do equipamento titular também falhar antes do retorno do reserva, há uma falha do sistema e o programa calcula quanto tempo este sistema vai ficar parado. A premissa é que o primeiro equipamento que falha é o primeiro que retorna e, que o tempo de indisponibilidade é o intervalo entre a falha do titular e o retorno do reserva. Depois de detectada a falha de 1, 2 ou de ambos, o programa computa o histórico do sistema e os dados que podem vir a ser utilizados nas análises de confiabilidade e, na sequência, gera novos TTF para 1 e 2 e zera TEMPO1 e TEMPO2.

A disponibilidade de cada sistema foi computada para um tempo de 86.000 horas ou, 10 anos de operação (STIME) e, depois de atingido este tempo, as variáveis de interesse são computadas e arquivadas. As simulações costumam ser repetidas “*m*” vezes para se obter um histograma de frequências e um valor médio para os parâmetros investigados. O número a partir do qual as repetições não alteram mais os resultados é considerado o valor adequado de “*m*”. Estes autores citam outros trabalhos com 10.000, 30.000 e, até 100.000 repetições.

Na Figura 7 mostra-se o trecho do código, uma subrotina onde são gerados os TTF1 e TTF2 a cada falha do conjunto 1 ou 2. Nesta sub-rotina também há uma sequência para verificar qual o componente tem o menor TTF, o que vai implicar que este será o primeiro a falhar e outra sequência para dizer se a falha foi no equipamento acionado ou no equipamento acionador. Estes valores serão computados em um contador o que vai permitir saber quantas vezes cada um falhou. Estes últimos contadores não têm relevância neste estudo, mas mostram o potencial que se tem ao segregar os modos de falha até o nível de componentes.

Figura 6 Sub-rotina para cálculo dos tempos até a falha



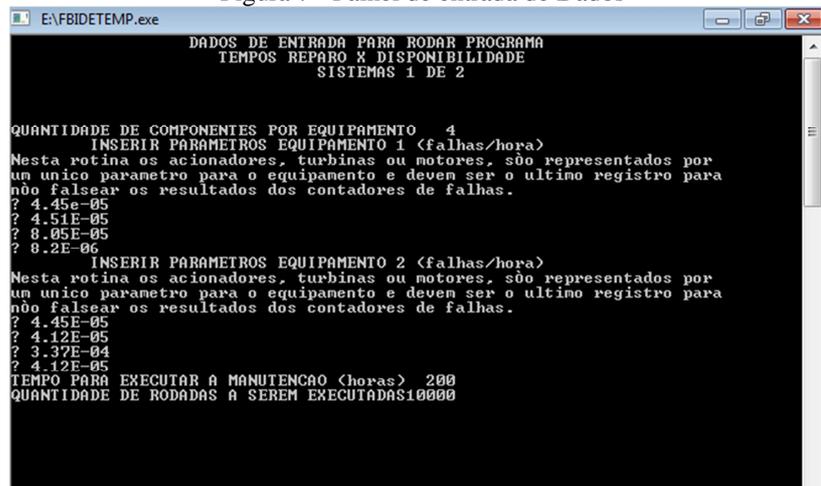
```

409 SUB GERA_ttf1
410   FOR A=1 TO N
411     TTF1(A)=-log(1-RND)/LAMBDA1(A)
412     IF TTF1(A)<=0 THEN
413       TTF1(A)=0
414     END IF
415   NEXT
416   if (TTF1(1)-TTF1(2))>0 then
417     Tempo_para_falha_1=TTF1(2)
418   else
419     Tempo_para_falha_1=TTF1(1)
420   end if
421   if n>2 then
422     for A=3 to n
423       if (tempo_para_falha_1-TTF1(A))>0 THEN
424         Tempo_para_falha_1=TTF1(A)
425       end if
426     next
427   end if
428   SOMA_TTF1=SOMA_TTF1+Tempo_para_falha_1
429   PRINT "MENOR TEMPO PARA FALHA DE 1:",Tempo_para_falha_1
430   if Tempo_para_falha_1=TTF1(1) then
431     SOMA_TTFMTR1=SOMA_TTFMTR1+Tempo_para_falha_1
432   Print "falha do acionador de 1"
433   else
434     SOMA_TTFBBA1=SOMA_TTFBBA1+Tempo_para_falha_1
435   Print "falha da bomba 1"
436   END IF |
437 END SUB

```

Na Figura 8 é mostrada a tela com os dados de entrada na rotina. Embora o padrão adotado tenha sido alternar os equipamentos (SINTVAL) a cada 178 horas, o tempo de cada simulação (STIME) de 86.000 horas e o número de repetições do processo (TRUN) como de 10.000 vezes, todos os parâmetros podem ser modificados. A rotina permite o uso de uma quantidade (n) de até 10 componentes. Na Figura 9, é apresentada a tela com as respostas obtidas após o processamento da simulação com os valores entrados na Figura 8. Esses resultados estão tabulados nas tabelas apresentadas na próxima seção, onde os resultados são apresentados e discutidos.

Figura 7 - Painél de entrada de Dados



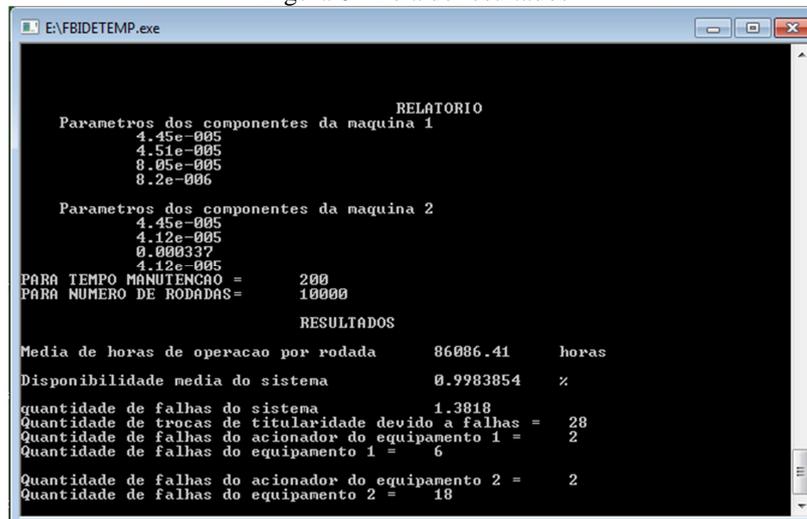
```

E:\FBIDETEMP.exe
DADOS DE ENTRADA PARA RODAR PROGRAMA
TEMPOS REPARO X DISPONIBILIDADE
SISTEMAS 1 DE 2

QUANTIDADE DE COMPONENTES POR EQUIPAMENTO 4
INSERIR PARAMETROS EQUIPAMENTO 1 <falhas/hora>
Nesta rotina os acionadores, turbinas ou motores, são representados por
um unico parametro para o equipamento e devem ser o ultimo registro para
não falsear os resultados dos contadores de falhas.
? 4.45e-05
? 4.51e-05
? 8.05e-05
? 8.2E-06
INSERIR PARAMETROS EQUIPAMENTO 2 <falhas/hora>
Nesta rotina os acionadores, turbinas ou motores, são representados por
um unico parametro para o equipamento e devem ser o ultimo registro para
não falsear os resultados dos contadores de falhas.
? 4.45e-05
? 4.12e-05
? 3.37E-04
? 4.12e-05
TEMPO PARA EXECUTAR A MANUTENCAO <horas> 200
QUANTIDADE DE RODADAS A SEREM EXECUTADAS 10000

```

Figura 8 - Tela de resultados



```

E:\FBIDETEMP.exe
RELATORIO
Parametros dos componentes da maquina 1
4.45e-005
4.51e-005
8.05e-005
8.2e-006
Parametros dos componentes da maquina 2
4.45e-005
4.12e-005
0.000337
4.12e-005
PARA TEMPO MANUTENCAO = 200
PARA NUMERO DE RODADAS = 10000
RESULTADOS
Media de horas de operacao por rodada 86086.41 horas
Disponibilidade media do sistema 0.9983854 %
quantidade de falhas do sistema 1.3818
Quantidade de trocas de titularidade devido a falhas = 28
Quantidade de falhas do acionador do equipamento 1 = 2
Quantidade de falhas do equipamento 1 = 6
Quantidade de falhas do acionador do equipamento 2 = 2
Quantidade de falhas do equipamento 2 = 18

```

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho foi realizado para uma unidade da fábrica em estudo. Na Tabela 3 estão tabulados os dados obtidos para um equipamento. Nesta tabela aparecem os registros de falhas com os dados tratados e processados. As datas de início e fim são fundamentais. Os modos de falhas foram substituídos pelos componentes que, ao falharem, geraram as falhas percebidas. Nas colunas de componente é indicado qual o componente falhou, indicado pela letra f, e quais os componentes foram substituídos sem que tivessem chegado ao fim da vida, indicado pela letra s. Neste exemplo a quantidade de falhas de filtros (que está fora das fronteiras do equipamento conforme a ABNT (2011) mas torna o sistema indisponível) foi considerada relevante ao ser comparada com a quantidade de falhas totais existentes e, portanto, foi incluída na planilha. Os tempos entre falhas e para reparos decorrem de cálculos e cruzamento de dados efetuados dentro da planilha.

Tabela 3 - Exemplos de dados de confiabilidade após tratamento para um equipamento

Identificador	Data de Início	Data de Fim	Tempo acumulado (horas)	Tempo para falha (horas)	Tempo para reparo (horas)	Mancal	Selo	filtro
B-3A	05/04/2004	06/04/2004	0		25		f	
B-3A	16/01/2005	28/02/2005	3887	3887	1032		f	
B-3A	01/05/2005	08/05/2005	4691	804	164			
B-3A	12/05/2009	03/07/2009	21677	16986	1260		f	
B-3A	05/02/2012	22/02/2012	34317	12640	420			f
B-3A	05/08/2012	07/08/2012	37425	3108	30			f

O cálculo dos parâmetros de forma é uma etapa necessária para as fases subsequentes do estudo. Havendo dados suficientes, no mínimo três falhas para o componente em análise, é utilizado o PROCONF. Observa-se que a quantidade de registros na Tabela 3 é muito pequena. Ao longo de 9 anos foram três falhas de selos e duas obstruções em filtros. Nesses casos, conforme explanado em 3.2, assume-se que a distribuição é exponencial e utilizando-se a equação (1) estima-se o parâmetro da função representativa. O mesmo aplicativo, ProConf, utilizado para calcular o parâmetro de forma que melhor se ajusta à amostra em análise, também executa rotinas de testes analíticos para verificar a aderência da amostra à distribuição escolhida. O processo é feito por teste de hipóteses, o que está explicado na Seção 3.2. Para todas as amostras foi aceita a hipótese nula, que afirma que a amostra pode vir de uma população que segue uma distribuição exponencial. Para testar a hipótese nula, o aplicativo executa tanto o teste do qui-quadrado como o teste Kolmogorov-Smirnov (KS).

Na Tabela 4 é apresentada uma pequena amostra dos parâmetros obtidos para os equipamentos estudados. Utilizando-se as equações 9 e 10, os resultados apresentados na Tabela 4 podem ser combinados para apresentar um parâmetro de forma único para cada conjuntos A e B (ver a Figura 8), compostos por um acionador, turbina a vapor ou motor elétrico e uma bomba. Essa forma de trabalhar traz uma simplificação na montagem da rotina computacional. A desvantagem é a perda da possibilidade de segregar as falhas por componente e, com isso a possibilidade de estimar o número de intervenções por modo de falha.

Tabela 4 - Parâmetros de forma para equipamentos da unidade avaliada

identificação	Parâmetros de forma λ (falhas/hora)				
	mancais	selagem	filtro	motor	turbina
B-1A	14,0E-06	69,8E-06	69,8E-06	44,5E-06	-
B-1B	14,0E-06	69,8E-06	69,8E-06	44,5E-06	-
B-7A	32,5E-05	32,6E-06	-	8,10E-06	-
B-7B	48,2E-06	48,2E-06	-	-	854E-06
B-11A	35,6E-06	83,1E-06	-	24,5E-06	-
B-11B	35,6E-06	83,1E-06	-	24,5E-06	-

Na Tabela 4 os parâmetros de forma são apresentados para os conjuntos de forma individual. Um conjunto B-1A e um conjunto B-1B formam um sistema. O mesmo ocorre para os demais conjuntos. Quando os parâmetros de A e de B são iguais, é porque os dados puderam ser agrupados.

Observa-se que os parâmetros de forma de cada componente e de cada equipamento são diferentes. Isto leva a concluir que, se forem testados dois sistemas diferentes com o mesmo tempo de reparo, a resposta em termos de disponibilidade seja diferente.

Voltando à Tabela 3, outro ponto a destacar são os tempos para reparo, que variam desde 25 horas até intervalos de 1300 horas. Longos tempos de manutenção, embora indesejados, não são um fato incomum. Isto pode ser verificado na Figura 3. Aquela figura consiste em um resumo das recomendações e observações da equipe de preditiva da fábrica. Não é o objetivo entrar em detalhes sobre o conteúdo da figura. O que se deseja é mostrar que situações em que equipamentos ficam meses em condição de indisponibilidade é uma realidade. Os equipamentos indisponíveis foram assinalados com setas. O quadro mostrado na figura é atualizado semanalmente e consolidado no final de cada mês. Isso justifica que, na Tabela 5, seja analisada a sensibilidade da disponibilidade dos sistemas para tempos de manutenção tão longos quanto três meses.

Na Tabela 5, estão os resultados de disponibilidade para todos os sistemas de bombeio da unidade, variando-se os tempos para reparo. Na proposta do estudo, é necessário definir-se qual a disponibilidade aceitável para os sistemas de bombeio da planta analisada, o que está relacionado com a demanda da própria planta, com os custos de manutenção e com as perdas financeiras decorrentes das interrupções de produção. Há vários artigos e livros abordando formas de calcular esta disponibilidade ótima (DEKKER; GROENENDIJK, 1995). Aqui, arbitrou-se que uma disponibilidade mínima aceitável para os sistemas de bombeio da planta seja 99%.

Tomando-se o sistema B-1AB, primeira linha da Tabela 6, observa-se que há muita pouca variação na disponibilidade se os tempos para reparo durarem 120 horas ou 480 horas. A disponibilidade de 99% será alcançada para um tempo de reparo um pouco maior que 480 horas. Já para o sistema B-6AB, a disponibilidade mínima vai ser obtida para algum valor entre 720 e 1440 horas, suponha-se 1000 horas. Isso quer dizer que, se algum dos equipamentos que compõem o sistema B-1AB e os do sistema B-6AB estiverem competindo pelos mesmos recursos de manutenção o planejador terá de verificar quanto tempo ainda falta para o equipamento de B-1AB atingir suas 500 horas de operação sem reparo e fazer o mesmo cálculo para o de B-6AB. Aquele que obtiver o menor valor deverá ser o primeiro a ser

atendido.

Tabela 5 - Tempos para reparo X disponibilidade dos sistemas (%)

Identificação	Tempos para reparo (horas)							
	120	240	360	480	720	1440	2880	3660
B-1AB	99,97	99,89	99,75	99,56	99,04	96,55	89,58	85,57
B-2AB	99,88	99,52	98,98	98,04	96,00	88,17	79,58	70,58
B-3AB	99,97	99,87	99,71	99,49	98,91	96,16	88,57	84,86
B-4AB	99,98	99,92	99,82	99,69	99,31	97,51	92,04	88,85
B-5AB	99,98	99,92	99,81	99,66	99,27	97,33	91,59	88,29
B-6AB	99,99	99,97	99,92	99,86	99,70	98,86	96,00	94,15
B-7AB	99,95	99,81	99,59	99,28	98,49	95,11	87,79	84,52
B-8AB	99,97	99,87	99,72	99,50	98,92	96,20	88,83	84,98
B-9AB	99,79	99,18	98,25	97,02	94,13	84,65	72,68	69,39
B-10AB	99,98	99,91	99,79	99,64	99,20	97,11	90,94	87,61
B-11AB	99,98	99,92	99,83	99,70	99,34	97,55	92,17	89,15
B-12AB	99,98	99,94	99,86	99,75	99,46	97,99	93,39	90,66
B-13AB	99,96	99,83	99,63	99,34	99,16	95,15	86,26	81,99
B-14AB	99,98	99,77	99,48	99,09	98,07	93,62	83,63	79,42

Especificamente sobre esta empresa, o sistema de planejamento computadorizado utilizado dispõe de um campo denominado “data desejada”. Esta informação é utilizada nas rotinas do aplicativo como um componente para definir as programações semanais e atualmente o campo é preenchido de forma subjetiva.

A metodologia proposta é neste artigo é:

- a partir das informações da Tabela 5, gerar curvas como as mostradas nos Figuras 10 e 11.

- correr as Figuras 10 e 11 horizontalmente, no nível de confiabilidade desejado até encontrar a curva de disponibilidade;

- descer nas Figuras 10 e 11 verticalmente, como mostram as setas, até o cruzamento com a linha das abscissas;

Estas serão os números de horas que, somadas às datas das respectivas falhas, vão gerar as datas desejadas em que os equipamentos deverão estar novamente disponíveis para operação.

Figura 9 - Curva disponibilidade x tempos para reparo do sistema de bombeio B-6AB

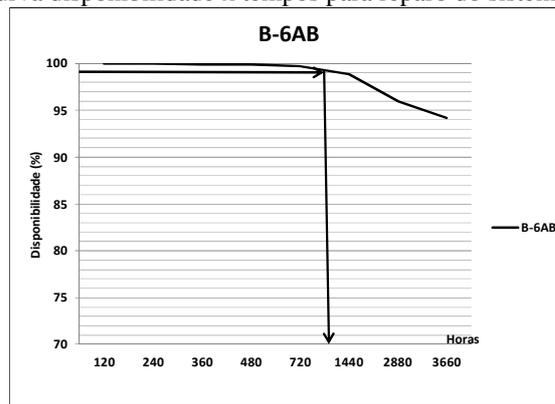
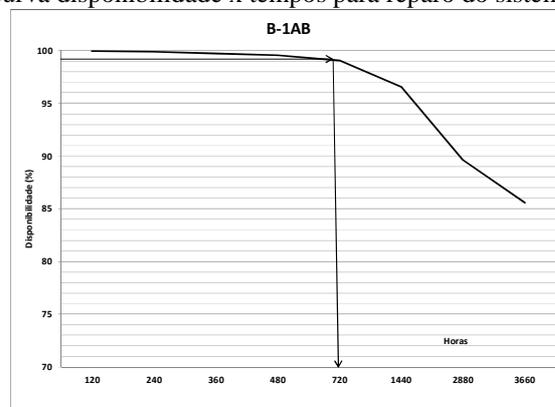


Figura 10 - Curva disponibilidade x tempos para reparo do sistema de bombeio B-1AB



No estudo foi arbitrada uma disponibilidade de 99%. Então, pode-se usar interpolação linear com os dados da Tabela 5 para, se calcular os tempos máximos recomendados de indisponibilidade dos equipamentos. Por exemplo, para o sistema de bombeio B-1AB deslocando-se sobre os dados de disponibilidade, verifica-se que 99% está entre 720 e 1440 horas de reparo. A partir daí, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{99,04-99,0}{99,04-96,55} = \frac{720-x}{720-1440} \quad (13)$$

Isolando-se x na equação o resultado é um tempo máximo de 731,6 horas. Fazendo o mesmo processo para cada sistema, obtêm-se os resultados na Tabela 6. A partir dos dados da Tabela 6, é fácil construir uma escala. Supondo que o qualquer dos equipamentos que compõem o sistema B-1AB tenha se tornado indisponível (qualquer das duas bombas ou dos dois motores), para manter a disponibilidade média na faixa de 99% para o sistema, esses equipamentos têm de retornar à linha em no máximo 731,6 horas. Suponha-se que um motor tenha passado à condição de indisponibilidade há 3 dias (72 horas), em uma escala de 0 (no

momento em que se tornou indisponível) a 100 (ao atingir o tempo limite), a prioridade deste equipamento para ter sua manutenção programada será:

$$\text{Prioridade do Motor } B_{-1} = [1 - (731,6 - 72)/731,6] * 100 \quad (14)$$

o que resulta em um número 9,84. Comparando este número com o dos demais equipamentos, está estabelecida uma prioridade onde o maior número deve ser programado primeiro.

Tabela 6 - Sistemas x tempo máximo para reparo para uma disponibilidade de 99%

Identificação	Tempos para reparo (horas)
B-1AB	731
B-2AB	355
B-3AB	683
B-4AB	800
B-5AB	820
B-6AB	1320
B-7AB	565
B-8AB	687
B-9AB	263
B-10AB	789
B-11AB	857
B-12AB	905
B-13AB	749
B-14AB	579

O intervalo de confiança com nível de certeza de 95% para distribuições normais é obtido utilizando a equação:

$$\alpha = \mu \pm 1,96 \cdot \left(\frac{\sigma^2}{n}\right)$$

Onde, μ é a média (no caso a disponibilidade média que se quer é 99%), 1,96 equivale ao valor crítico de $Z_{0,05}$ e $Z_{0,95}$ na curva normal, σ^2 é a variância dada pelo quadrado de $(x - \mu)$ e n é a população que é TRUN.

Para verificar se os tempos recomendados na Tabela 6 estão corretos, realizou-se uma comparação entre estes resultados e os dados de campo a partir dos quais todo o trabalho foi feito. Para cada sistema estudado, foram contabilizadas todas as ocorrências em que os tempos de falhas entre os conjuntos A e B tenham sido menores que o tempo de reparo recomendado e calculada a disponibilidade resultante. Apresenta-se o resultado obtido para os conjuntos B1AB, B2AB e B14AB. O conjunto B1AB tem um intervalo de confiança para a disponibilidade entre 98,96 e 99,04%. Para um período de 21800 horas apresentou uma falha na qual o tempo entre as falhas dos conjuntos A e B foram menores que 731 horas e que foi de 500 horas. Calculando a disponibilidade do sistema, o valor encontrado é de 98,98, dentro do intervalo de confiança. Para o conjunto B2AB, o intervalo de confiança para a

disponibilidade está entre 98,93% e 99,06%. As ocorrências com tempos menores que o tempo para reparo recomendado (355 horas) foram: 198 horas, 172 horas, 123 horas, 0 horas e 168 horas. A estimativa de falhas foram de 5 falhas o que foi confirmado. A disponibilidade calculada foi de 98,93%. Para o conjunto B14AB, o intervalo de confiança para a disponibilidade é de 98,92% e 99,07%. As intervenções abaixo do tempo para reparo recomendado (579 horas) foram: 0 horas, 456 horas e 192 horas. A disponibilidade calculada foi de 98,93%. A quantidade de falhas está igual à estimada.

3.5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um critério para suportar a definição das prioridades de manutenção dos equipamentos de uma planta industrial, baseado em dados de confiabilidade e técnicas estatísticas, aplicadas nos estudos de confiabilidade.

O fator mais importante que justifica a sua utilização é reduzir a subjetividade no processo decisório, mostrando que, para alguns sistemas, é possível o alongamento dos prazos de manutenção obtendo-se um melhor nivelamento dos recursos disponíveis.

Para se chegar a este resultado, foi necessário realizar um tratamento manual dos registros de confiabilidade, mesmo a empresa utilizando um sistema computadorizado de gerenciamento da manutenção. Após o tratamento dos dados, foi determinado se as distribuições poderiam ser consideradas como exponenciais, calculadas as taxas de falhas de cada equipamento, criada uma rotina computacional para realizar as simulações e obter os resultados de disponibilidade em função dos tempos de manutenção.

Este trabalho tem como continuidade a extensão dos cálculos para as demais unidades da empresa e a extensão do estudo para os sistemas que têm uma configuração diferente de *cold standby* com alternância, o que implica na criação de rotinas de computação específicas para cada sistema. De posse das taxas de falha, há toda uma gama de estudos de confiabilidade que podem ser realizados. Uma sugestão é analisar se a forma de operação, com alternância, e se o período de alternância utilizados são as melhores formas de se operar a planta.

A rotina de programação criada para este estudo apresentou como resultado apenas a disponibilidade dos sistemas e, baseada nesta última, a equação de priorização das atividades de manutenção programadas. Entretanto, com pequenas alterações, é possível obter outras informações interessantes. Em especial, recomenda-se a utilização dos resultados deste trabalho no levantamento de recursos (sobressalentes e mão de obra) para os anos seguintes e na redefinição das prioridades da engenharia de manutenção.

3.6 REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Dennis. Application of Monte Carlo simulations to system reliability analysis. In: PUMP USERS SYMPOSIUM, 20., 2003, Houston. **Proceeding**. [s.l.]: Turbolab/TAMU, 2003. v. 1, p. 91 - 94. Disponível em: <<http://turbolab.tamu.edu/proc/pumpproc/P20/10.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

ANSELL, Ji; PHILLIPS, M. J.. PRACTICAL PROBLEMS IN THE STATISTICAL-ANALYSIS OF RELIABILITY DATA. **Journal Of The Royal Statistical Society: Applied statistics**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.205-247, jan. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14224**: Indústrias de petróleo e gás natural – Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção. 1 ed. Rio de Janeiro, 2011. 225 p.

BALABAN, Harold S.. Reliability Models and Data Analysis for Repairable Products. In: PECHT, Michael *et al.* **Product Reliability, Maintainability, and Supportability Handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. Cap. 12. p. 299-324. ISBN: 978-0-8493-9879-7.

CALIXTO, Eduardo. Reliability, Availability, and Maintainability Analysis. **Gas And Oil Reliability Engineering**, [s.l.], p.169-347, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-391914-4.00004-6>.

CALLIGARO, Cleber. **Proposta de fundamentos habilitadores para a gestão da manutenção em indústrias de processamento con.** 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Ppgep, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3977/000395549.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

COCOZZA-THIVENT, Christiane. MUT of a one out of two system with preventive maintenance. **European Journal Of Operational Research**, [s.l.], v. 182, n. 3, p.1203-1229, nov. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.042>.

CONOVER, W J.. **Practical nonparametric statistics**. Nova York: John Wiley And Sons, 1999. ISBN 0-471-16068-7.

DEKKER, R; GROENENDIJK, W.. AVAILABILITY ASSESSMENT METHODS AND THEIR APPLICATION IN PRACTICE. **Microelectronics And Reliability**, [s.l.], v. 35, n. 9, p.1257-1274, set. 1995.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

GOEL, L.R.; TYAGI, P.K.; GUPTA, Rakesh. Cost analysis of a two-unit chargeable standby system with interchangeable units and two types of fa. **Microelectronics Reliability**, [s.l.], v. 32, n. 6, p.775-779, jun. 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90042-j](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(92)90042-j).

HAMEED, Z.; VATN, J.; HEGGSET, J.. Challenges in the reliability and maintainability data collection for offshore wind turbines. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 36, n. 8, p.2154-2165, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.008>.

HAUPTMANN, Ulrich. Reliability data acquisition and evaluation in process plants. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.266-273, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2010.09.005>.

HOLSTE, J. Scott; FIELDS, Dail. Trust and tacit knowledge sharing and use. **J Of Knowledge Management**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.128-140, 23 fev. 2010. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/13673271011015615>.

JARDINE, A.K.S.; BUZACOTT, J.A.. Equipment reliability and maintenance. **European Journal Of Operational Research**, [s.i.], v. 19, n. 3, p.285-296, mar. 1985. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90124-9](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(85)90124-9).

KAYA, Ekin; PERVANE, Can; DEMIRHAN, Hayar. A Generic Monte Carlo Simulation Algorithm For The Availability Prediction Of The Devices With Cold Stand-By Units. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN SYSTEM SIMULATION, 4., 2012, [s.l.]. **ARTICLE**. [s.l.]: IARIA XPS, 2013. v. 1, p. 11 - 17. Disponível em: <http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=simul_2012_1_30_50109> . Acesso em: 10 abr. 2016.

LAFRAIA, J R.. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. (ISBN 978-85-730-3792-0).

LEUNG, Kit Nam Francis; ZHANG, Yuan Lin; LAI, Kin Keung. Analysis for a two-dissimilar-component cold standby repairable system with repair priority. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 96, n. 11, p.1542-1551, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2011.06.004>.

LI, Lin; NI, Jun. Short-term decision support system for maintenance task prioritization. **International Journal Of Production Economics**, [s.l.], v. 121, n. 1, p.195-202, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.006>.

LOUIT, D.M.; PASCUAL, R.; JARDINE, A.K.S.. A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 94, n. 10, p.1618-1628, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2009.04.001>.

MANZINI, Riccardo *et al.* Reliability Evaluation and Reliability Prediction Models. In: MANZINI, Riccardo *et al.* **Maintenance for industrial systems**. [s.l.]: Springer, 2010. p. 133-188. e-ISBN 978-1-84882-575-8.

MÁRQUEZ, A. Crespo *et al.* The maintenance management framework. **Journal Of Quality In Maintenance Engineering**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.167-178, maio 2009. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/13552510910961110>.

MOKADDIS, G S; TAWFEK, M L; ELHSSIA, S A M.. Analysis of a two-dissimilar unit cold standby redundant system subject to inspection and random change in units. **Microelectronics Reliability**, [s.l.], v. 37, n. 2, p.329-334, fev. 1997.

MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance**. 2. ed. Nova York: Industrial Press Inc., 1997. ISBN 978-0-8311-3164-3.

MURARI, K.; MARUTHACHALAM, C.. A system with two subsystems working in alternating periods. **Microelectronics Reliability**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.405-412, jan. 1982. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(82\)90016-6](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(82)90016-6).

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. ISBN 978-85-352-3353-7.

ROSS, Sheldon. The Exponential Distribution and the Poisson Process. In: ROSS, Sheldon. **Introduction to Probability Models**. 11. ed. Oxford: Academic Press, 2014. Cap. 5. p. 277-356. ISBN: 978-0-12-407948-9.

SAATY, Thomas L.. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal Of Operational Research**, [s.l.], v. 48, n. 1, p.9-26, set. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i).

SCARF, Philip A.. On the application of mathematical models in maintenance. **European Journal Of Operational Research**, [s.l.], v. 99, n. 3, p.493-506, jun. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217\(96\)00316-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00316-5).

SEO, J.H.; JANG, J.S.; BAI, D.S.. Lifetime and reliability estimation of repairable redundant system subject to periodic alternation. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 80, n. 2, p.197-204, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0951-8320\(03\)00030-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0951-8320(03)00030-9).

SIKORSKA, J.Z.; HODKIEWICZ, M.; MA, L.. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v. 25, n. 5, p.1803-1836, jul. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.018>.

VICENTINI, Andre Victor T. *et al.* **FREEBASIC**. 2004-2016. Site público. Disponível em: <<http://www.freebasic.net>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: Planejamento e método**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 200 p.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como tema o estudo de sistemas redundantes do tipo cold standby e submetidos a alternância, do tipo um de dois. Isso quer dizer que esses sistemas dispõem de dois equipamentos sendo que, um deles opera enquanto o outro permanece parado. Periodicamente, o equipamento reserva, que está parado, é posto em operação, e o equipamento que vinha operando é parado e deixado como reserva.

Estes tipos de sistemas são encontrados com frequência nos sistemas de bombeio e compressão nas indústrias químicas e petroquímicas onde, as perdas de produção por falhas de equipamentos podem atingir valores elevados. Nesses ambientes, manter a disponibilidade dos sistemas é uma prioridade.

Como objetivos, utilizou-se uma metodologia baseada em conceitos de confiabilidade para definir, a partir do momento em que um dos equipamentos se torne indisponível, quanto tempo o sistema pode ficar sem esta reserva sem comprometer a sua disponibilidade. A partir do conhecimento deste tempo, foi desenvolvido um indicador para ser utilizado na priorização dos serviços de manutenção.

O trabalho foi estruturado em dois artigos. No primeiro artigo, os registros existentes nos bancos de dados da empresa foram resgatados e trabalhados para se tornarem informações úteis ao estudo de confiabilidade. Como consequência deste trabalho, verificou-se que mais da metade dos registros continham algum tipo de problema. Cada problema encontrado foi descrito e propôs-se regras e procedimentos para resolvê-los. Também foi proposto o cruzamento de dados do banco de dados de confiabilidade com os dados de operação para obter os tempos de operação efetiva dos equipamentos, mais recomendado para os estudos subsequentes do que os tempos de calendário. Uma última contribuição foram sugestões que, se implementadas, reduziriam a recorrência dos problemas identificados nos novos registros.

O artigo 2 seguiu os passos recomendados na literatura para verificar se as amostras de equipamentos similares poderiam ser agrupadas. Uma vez obtidas amostras com número de observações suficiente, estas foram testadas para verificar se a hipótese de que as distribuições de falhas fossem exponenciais poderia ser aceita e, na sequência, foram calculadas as funções de densidade de falhas de cada equipamento ou componente. A partir dessas funções, desenvolveu-se uma rotina computadorizada para, através do uso de

metodologia de Monte Carlo, estimar os tempos máximos que os equipamentos podem ficar indisponíveis sem comprometer o sistema ao qual pertencem. Esse tempo máximo de indisponibilidade se confunde com o próprio tempo para reparo dos equipamentos. Como esse tempo máximo de indisponibilidade (ou tempo máximo para reparo) dos equipamentos é função do nível de disponibilidade desejado para o sistema, foram criadas tabelas de simples utilização, com curvas de Disponibilidade do sistema x tempo para reparo. Finalmente, a partir dos tempos máximos para reparo, criou-se um indicador para ser usado na priorização dos serviços. Este indicador consiste em uma regra de três inversa, onde quanto mais perto de atingir o tempo máximo calculado, maior o valor do indicador, cujo valor é contínuo e varia de zero a cem.

Voltando ao artigo 1, quanto aos registros, pode-se afirmar que, apesar dos problemas encontrados, eles contêm a informação necessária para se realizar estudos complexos de confiabilidade. No entanto, não há forma fácil de resgatá-la, pois não há sistema computadorizado que abarque todo o conhecimento necessário para o resgate das informações. Há a necessidade de que o trabalho de análise seja realizado manualmente.

A contribuição deste trabalho é eminentemente prática, ao mostrar que é possível realizar estudos de confiabilidade e disponibilidade pautados nos dados já disponíveis e trazendo informações quanto aos níveis quantitativos de confiabilidade e disponibilidade dos sistemas e equipamentos e suas interrelações que são pouco conhecidos pela empresa. Isso pode contribuir para uma mudança de cultura organizacional, fazendo com que as decisões sejam mais baseadas em modelos matemáticos e mostrando àqueles que coletam os dados de confiabilidade as possibilidades e resultados do seu trabalho, levando-os a valorizarem a coleta de dados e tornando-a mais precisa. Como resultado deste trabalho, pode-se verificar que os prazos de manutenção em sistemas críticos podem ser alongados, reduzindo-se a quantidade de horas extras executadas e, também, a quantidade de itens em estoque.

4.2 PROPOSIÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar continuidade ao estudo desenvolvido nesta dissertação, são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- desenvolver uma rotina de computação para cada tipo de sistema redundante encontrado nas empresas da indústria química e petroquímica. Na planta em estudo, foram encontrados sistemas onde dois operam e um é reserva, sistemas com dois ou três operando e três reservas, alguns casos de *hot standby*, onde dois equipamentos operam, mas um está em

carga e outro não.

- estender o estudo para todos os equipamentos da fábrica em estudo.

- utilizar as rotinas já escritas e as funções de densidade de falha já calculadas para realizar trabalhos similares para estimar as quantidades de falhas futuras e usar esses resultados na estimativa de recursos de manutenção necessários nos próximos exercícios (mão de obra e sobressalentes).