

DIAGRAMA DE BLOCOS E PROCESSOS DE RENOVAÇÃO GENERALIZADOS PARA MODELAGEM DE BANCOS DE DADOS DE CONFIABILIDADE

Rafael Valença Azevedo
azevedo144@hotmail.com

Ricardo José Ferreira
rickhardo@gmail.com

Pedro Afonso de Albuquerque Furtado
pedro_a_furtado@hotmail.com

Márcio das Chagas Moura
marciocmoura@gmail.com

Henrique López Droguett
ealopez@uol.com.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia de Produção, CEERMA –
Centro de Estudos e Ensaios em Risco e Modelagem Ambiental
Av. da Arquitetura S/N, Cidade Universitária, CEP: 50740550, Recife-PE

RESUMO

O desenvolvimento de um banco de dados de confiabilidade (BDC) consiste basicamente de duas etapas: a elaboração de uma taxonomia dos equipamentos do sistema para a coleta de dados e a obtenção das métricas de confiabilidade. Este artigo apresenta a metodologia de elaboração da taxonomia para equipamentos da indústria de petróleo e utiliza as técnicas de análise funcional de sistemas via Diagrama de Blocos (DB) e de análise da eficácia de reparo via Processos de Renovação Generalizados (PRG) para modelagem de BDC's. Para exemplo, tais metodologias são aplicadas a um equipamento da indústria de petróleo e gás.

PALAVRAS CHAVE: Bancos de Dados de Confiabilidade, Processos de Renovação Generalizados, Diagrama de Blocos.

Área principal (Modelos Probabilísticos - MP, PO na área de Petróleo e Gás – P&G)

ABSTRACT

The development of a Reliability Database (RDB) consists basically of two steps: the development of taxonomy of system equipment for data collection and obtaining of reliability metrics. This paper presents the method for elaboration of the taxonomy of equipment for the oil industry and uses the techniques of functional analysis of systems through the Block Diagram (BD) and analysis of the effectiveness of repair via Generalized Renewal Processes (GRP) for modeling BDC's. For example, such methodologies are applied of equipment of industry of petroleum and natural gas.

KEYWORDS: Reliability Database, Generalized Renewal Processes, Reliability Diagram Blocks.

Main area (Probabilistic Models, OR in the area of Oil and Gas)

1. Introdução

A aplicação de análises de confiabilidade, manutenção e segurança de sistemas em indústria de petróleo e gás natural exige um elevado esforço de coleta de dados de falha de equipamentos. A qualidade da análise está diretamente ligada à qualidade dos dados que estão sendo utilizados, geralmente compilados de banco de dados de diversas fontes.

Segundo Fragola (1996), fontes publicadas de dados de confiabilidade têm uma longa história que remonta desde a época das embarcações à vela do século XVII. A evidente importância destes dados na previsão de eventos futuros induziu a inúmeros projetos de banco de dados de confiabilidade (BDC's) que foram evoluindo e, estruturalmente, incorporando atributos que diferenciam a aplicação, o ambiente externo, o ambiente interno, o tipo e o operador dos equipamentos, além de uma análise mais detalhada dos eventos de falha e manutenção, permitindo a compreensão de como estes atributos influenciam na confiabilidade do equipamento.

Dentro do contexto de confiabilidade, entretanto, apenas recentemente, mais precisamente no início da década de 70, é que grandes BDC's foram desenvolvidos e publicados para usos em áreas como produção de petróleo e gás *offshore*, e geração de energia elétrica em usinas nucleares. É o caso, por exemplo, do segmento de instalações de perfuração e exploração de petróleo com os bancos de dados WELLMASTER (SINTEF, 1995) e o OREDA (*Offshore Reliability Data*) (SINTEF, 2004), desenvolvido por um grupo de companhias de petróleo e gás para instalações *offshore*. Contudo, a simples extrapolação de tais dados para instalações específicas gera resultados vistos com reserva. De Souza e Drogue (2003) destacam que dados de falha coletados no próprio sistema têm grande validade, refletindo as práticas de projeto, operação e manutenção adotadas e as condições externas existentes. Diante disso, diversos setores da indústria do petróleo têm optado por desenvolver e manter seus próprios BDC's.

O desenvolvimento de um BDC consiste, basicamente, de duas etapas: Elaboração de uma taxonomia dos equipamentos do sistema para a coleta das informações e a obtenção de métricas de confiabilidade a partir dos dados coletados.

A norma ISO14224 (2006) fornece orientações e requisitos para processos de coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos de indústrias de petróleo, petroquímicas e gás natural. Com este objetivo, fornece orientações gerais para o desenvolvimento da taxonomia dos equipamentos do sistema, ou seja, uma classificação dos equipamentos em grupos genéricos baseados em fatores possivelmente comuns a vários deles.

Inúmeras técnicas e ferramentas de análise RAM (do inglês – *Reliability, Availability and Maintainability*) podem ser aplicadas a partir dos dados extraídos dos BDC's. As condições de operação e manutenção do equipamento, bem como de acessibilidade às informações, determinarão a melhor ferramenta a ser utilizada nas análises, visando obter métricas mais realistas. Em se tratando de equipamentos sujeitos a ações de manutenções corretivas e preventivas que não sejam a completa substituição do equipamento, a análise da confiabilidade e da disponibilidade via Processo de Renovação Generalizada (PRG), proposto por Kijima e Sumita (1986), tem sido a mais indicada na literatura, por tratar todos os tipos de reparos possíveis, quanto a sua eficácia.

Uma grande parte dos modelos probabilísticos que tratam de ações de reparo utiliza hipóteses simplificadoras, as quais, conservadoras ou não, não conseguem representar de forma fidedigna sistemas passíveis de reparo. Por exemplo, tais modelos assumem as hipóteses de que, após o reparo, o sistema volta a desempenhar a função como se fosse novo, denominado de reparo perfeito, ou que, após o reparo, o sistema é tão ruim quanto o velho, sem acrescentar nenhuma melhoria ao seu desempenho, caracterizando um reparo mínimo. Em sistemas reparáveis, tais situações ocorrem com raridade e, portanto, sua representação por esses modelos pode levar a resultados vistos com reservas.

Moura *et al.* (2007) ressaltam que, geralmente, a ação de reparo melhora o desempenho do equipamento a uma condição intermediária entre o reparo perfeito e o reparo mínimo, é o chamado reparo geral ou imperfeito, o qual é uma generalização dos reparos mínimos e perfeitos. Além disso, existe a possibilidade, mesmo que remota, de um reparo fornecer ao equipamento

um desempenho além dos extremos, são os chamados reparo pior, levando o equipamento a um estado pior do que antes da falha, e reparo melhor, levando o equipamento a um estado melhor de que quando novo.

O PRG é um modelo de idade virtual, um conceito que classifica o reparo de acordo com o grau de redução que proporciona sob a idade real do equipamento, mensurada por um parâmetro q de rejuvenescimento. Dessa forma, consegue modelar todos os reparos citados.

Além disso, a definição da taxonomia para a coleta e armazenamento dos dados, permite a obtenção de informações sobre os eventos de falha e manutenção nos componentes e subsistemas que compõem o equipamento, portanto, a representação dos equipamentos e sistemas, bem como a realização das análises de confiabilidade por Diagrama de blocos (DB) tende a ser empregada, permitindo uma análise mais realista e compreensiva do sistema. DB é uma rede que mostra as conexões lógicas dos componentes para o funcionamento do sistema. A representação por diagrama de blocos é bastante utilizada pelos analistas de confiabilidade, pois, além de proporcionar uma fácil visualização dos componentes sob análise, é construído de maneira simples e intuitiva, conforme explicitado em Rausand e Høyland (2004).

Vale ressaltar que as abordagens clássicas de DB e PRG não levam em consideração os tempos de reparos. Dessa maneira, a análise conjunta dessas metodologias com um estudo simples de adequação de tempos de reparo a distribuições de probabilidade fornece um estudo mais realístico do caso analisado. Entretanto, o fato do estudo está hibridizando metodologias estocásticas faz com que a solução seja obtida através de simulação, não havendo assim uma forma analítica de resolução explicitada.

Este artigo está orientado para a um processo de coleta estruturada de dados (procedimento qualitativo da pesquisa), com o interesse de realçar o grande valor de desenvolver bancos de dados para o cenário na qual a empresa está inserida, validando a taxonomia desenvolvida com o emprego de metodologias de análise de componentes reparáveis via PRG, extrapolando seus resultados para uma análise de confiabilidade de sistemas através de diagramas de blocos.

O presente artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2, apresentam-se os conceitos de Taxonomia, DB e PRG. A Seção 3 descreve brevemente a metodologia utilizada no trabalho. Na Seção 4, resultados serão demonstrados para aplicação a uma situação real. A Seção 5 apresenta as conclusões.

2. Fundamentação teórica

É apresentada aqui a fundamentação utilizada para justificativa e base da metodologia aplicada. De início, a importância de um BDC estruturado é justificada por conceitos taxonômicos para que, em seguida, a base teórica de DB e PRG seja introduzida.

2.1. Taxonomia para BDC's

O desenvolvimento dos Bancos de Dados de Confiabilidade, em resumo, consiste na elaboração de uma taxonomia dos equipamentos, que guiará a coleta de dados, e na obtenção das métricas em si. A Figura 1 retrata a utilização dos BDC's na gestão RAM (do inglês – Reliability, Availability and Maintainability) e de Riscos.

Cooke e Bedford (2002) destacaram a perspectiva de utilização dos BDC's e Rausand & Oien (1996) apresentaram os principais conceitos da análise de falhas úteis para elaboração de uma taxonomia consistente que possa dar origem a bancos de dados confiáveis.

De acordo com a ISO 14226 (2006), a taxonomia é uma classificação sistemática de itens em grupos genéricos com base em fatores possivelmente comuns a vários desses itens (localização, uso, subdivisão do equipamento, etc.). Para que dados de falha possam ser coletados, importados, agregados e comparados, a partir de outras fontes de dados, é essencial que exista um procedimento de classificação e armazenamento de dados que seja baseado em características de projeto e processos dos equipamentos que afetem a confiabilidade. De Souza e Droguett (2003) revelam que esse procedimento, denominado de taxonomia, é extremamente útil por estabelecer

categorias de equipamentos cujas taxas de falha têm menor grau de incerteza do que taxas de falha de bancos de dados genéricos.

Por definir o escopo da coleta de dados, a taxonomia é a diretriz dos processos de coleta de dados. A metodologia para elaboração da taxonomia utilizada neste trabalho tomará como base a ISO 14224 (2006), por ser uma norma internacional e favorecer a padronização, importante para procedimentos de troca de dados entre os diversos bancos existentes, e o trabalho de Souza e Drogue (2003), os quais propuseram uma taxonomia de BDC's para a distribuição de gás natural.

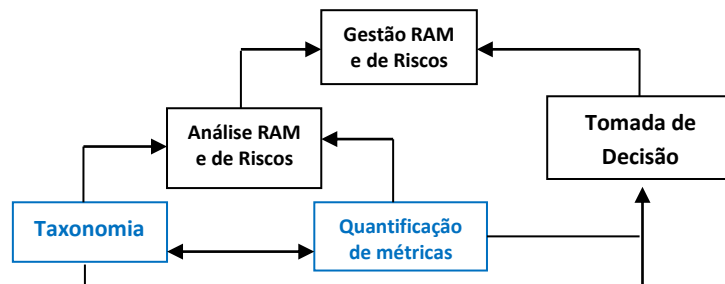


Figura 1 - Utilização dos BDC's na Gestão RAM e de Riscos

2.2. Diagrama de blocos

Sistemas são compostos por conjuntos de itens como subsistemas, componentes, *softwares* e operadores cada qual com sua função, cujo funcionamento adequado e coordenado implica o próprio funcionamento do sistema. Assim, para o estudo da análise de confiabilidade de um sistema é imprescindível que o analista determine as relações funcionais entre os componentes bem como as suas probabilidades e taxa de falhas a fim de estimar a confiabilidade do sistema como um todo.

A representação por diagrama de blocos é uma prática largamente empregada neste tipo de análise por apresentar uma fácil visualização de todas as partes fundamentais que compõem o sistema sob análise, tornando-se uma forma de expressão comum entre cientistas, engenheiros e técnicos que atuam na área. Estes, geralmente, utilizam diagrama de blocos para modelar o impacto das falhas dos componentes no funcionamento do sistema, como demonstrado em Lisnianski (2007), que expande o método clássico de diagrama de blocos para um sistema multiestados reparável e em Guo e Yang (2007), que propõem uma forma para a verificação da integridade de segurança do sistema.

Segundo Rausand e Høyland (2004), cada bloco representa uma função desempenhada por um componente ou conjunto de componentes refletindo a relação funcional entre eles, embora não contenha nenhuma informação relativa à estrutura física do sistema. A metodologia de diagrama de blocos é capaz de representar diversas disposições de um sistema em estudo. São elas:

- Disposição em série: Diz-se que o sistema está disposto em série quando a falha de qualquer um dos componentes implica a falha do sistema como um todo. Porém, isto não quer dizer que a falha de um componente implica a falha de outro, mas sim a falha do sistema. A Figura 2 demonstra um sistema em série com n componentes.

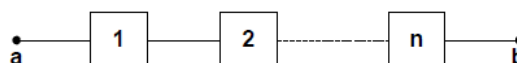


Figura 2 – Diagrama de blocos para um conjunto de componentes que estão dispostos em série.

A confiabilidade de um sistema em série é dada pela Equação 1:

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t), \quad \text{Equação 1}$$

onde $R_i(t)$ representa a confiabilidade de cada um dos n componentes.

- Disposição em paralelo: Diz-se que o sistema está disposto em paralelo (sistema em redundância) quando apenas um dos componentes é necessário para que o sistema funcione, ou seja, o sistema falha apenas se todos os componentes falharem. A Figura 3 demonstra um sistema em paralelo com n componentes.

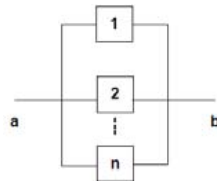


Figura 3 – Diagrama de blocos para um conjunto de componentes que estão dispostos em paralelo.

A confiabilidade de um sistema em paralelo é dada pela Equação 2:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)], \quad \text{Equação 2}$$

- Disposição em série-paralelo (misto): São típicos de sistemas complexos (mais comuns na prática), cujos componentes se dispõem tanto em série quanto em paralelo. A Figura 4 demonstra um sistema misto.

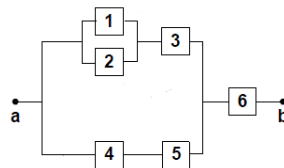


Figura 4 – Diagrama de blocos para um conjunto de componentes que estão dispostos em forma mista.

A confiabilidade do sistema é determinada a partir das confiabilidades de seus componentes a depender se está em série ou em paralelo, sendo assim calculada a partir das equações anteriores. Entretanto, um aspecto relevante em sistemas reparáveis é a eficácia do reparo, seu estudo é tratado em uma classe chamada de modelos de idade virtual, dentre os quais se cita o Processo de Renovação Generalizado que será abordado na próxima Seção.

2.3. Processo de Renovação Generalizado (PRG)

A análise de manutenção pode ser feita por diversas metodologias. As mais comumente utilizadas são modeladas pelo Processo de Renovação (PR) e o Processo Não Homogêneo de Poisson (PNHP) (Yañez *et al*, 2002). O PR caracteriza um reparo perfeito, isto é, após a ação do reparo o sistema volta à operação com o mesmo desempenho que tinha quando novo. Já no PNHP os tempos entre falhas seguem uma distribuição exponencial, assumindo que o reparo recupera o sistema falho a uma condição de desempenho que o mesmo possuía imediatamente antes da falha, denominado de reparo mínimo. Maiores detalhes sobre PR e PNHP são discutidos em Ross (2007) e em Davenport (1970).

Entretanto, tais metodologias não retratam a realidade de maneira mais adequada, pois geralmente uma ação de reparo melhora o desempenho de um sistema falho a uma condição intermediária entre pior do que novo e melhor do que antes da falha. Em resumo, o estado de desempenho de um sistema após o reparo pode ser categorizado da seguinte maneira:

- Reparo Melhor – “melhor do que novo”;
- Reparo Perfeito – “tão bom quanto novo”;
- Reparo Imperfeito – “pior do que novo, mas melhor do que velho”;
- Reparo Mínimo – “tão ruim quanto velho”;
- Reparo Pior – “pior do que velho”.

Visando abordar apropriadamente todos os estados de desempenho, Kijima e Sumita (1986) propuseram um modelo probabilístico que trata todos os tipos de ação de reparo citados, o qual foi denominado Processo de Renovação Generalizado (PRG).

O PRG é um modelo probabilístico, pertencente à classe de modelos de idade virtual, utilizado para estimar os tempos entre falhas do sistema condicionado à eficácia dos reparos que sofre, esta geralmente é representada pelo parâmetro q , denominada de parâmetro de rejuvenescimento. A eficácia de uma ação de reparo pode ser entendida como a capacidade de restaurar um sistema falho a um estado de funcionamento determinado justamente pela eficácia.

Para o completo entendimento do PRG é necessário definir o conceito de idade virtual x_i , que representa a redução na idade real t_i do sistema promovida pela i -ésima ação de reparo. Em Kijima e Sumita (1986) foram propostos dois tipos de modelos de idade virtual. O primeiro, chamado de *Kijima tipo I*, fundamenta-se na idéia que o i -ésimo reparo atua apenas nos danos acumulados durante o tempo entre $(i-1)$ e i -ésima falha. Deste modo, sendo t_1, t_2, \dots , tempos sucessivos entre falhas a idade virtual sofre incrementos proporcionais com o tempo:

$$x_i = x_{i-1} + q \cdot h_i = q t_i, \tag{Equação 3}$$

onde x_i é a idade virtual do equipamento após a i -ésima falha e h_i é o tempo entre a ocorrência da $(i-1)$ -ésima e a i -ésima falha.

O segundo, chamado de *Kijima tipo II*, considera que o reparo pode atuar nas falhas decorrentes de todo intervalo operacional, logo, a idade virtual sofre incrementos proporcionais durante todo o intervalo:

$$x_i = q(h_i + x_{i-1}) = q(q^{i-1}h_1 + q^{i-2}h_2 + \dots + h_i), \tag{Equação 4}$$

Qualquer que seja o modelo Kijima considerado é possível prever o tempo h_i entre a $i-1$ e i -ésima falha através da função de distribuição acumulada condicionada na idade virtual x_{i-1} :

$$F(h_i|x_{i-1}) = P(T \leq h_i | T \geq x_{i-1}) = \frac{F(h_i + x_{i-1}) - F(x_{i-1})}{1 - F(x_{i-1})}, \tag{Equação 5}$$

onde $F(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada do tempo até a primeira falha.

A relação entre t_i e x_i , como ilustrada na Figura 5, dependerá do tipo de reparo, ou seja, do valor assumido por q , o que pode ser feito, em geral, de três maneiras:

- $q = 0$: corresponde a um reparo perfeito, já que a idade virtual x_i é sempre anulada após a i -ésima ação de reparo;
- $0 < q < 1$: corresponde a um reparo imperfeito, já que x_i é uma fração da idade real t_i ;
- $q = 1$: corresponde a um reparo mínimo, já que x_i é exatamente igual à idade real t_i .

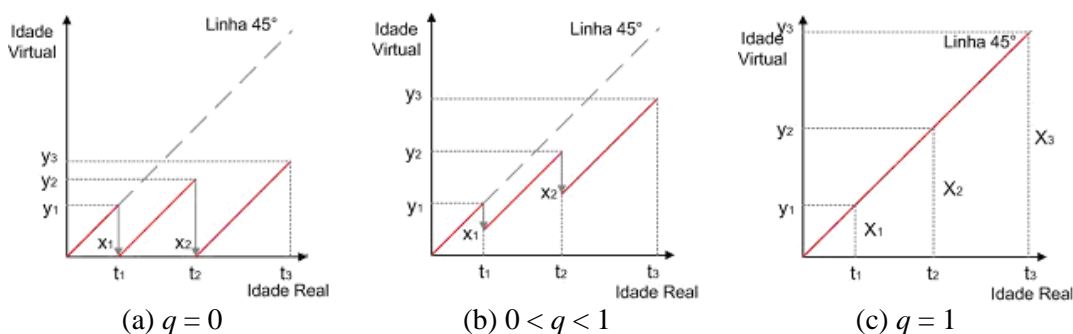


Figura 5 – Relação entre idade virtual e idade real.

Outros valores para o parâmetro q são também possíveis, como $q < 0$ e $q > 1$ que correspondem ao “reparo melhor” e ao “reparo pior”, respectivamente. Porém, valores realísticos para o parâmetro q estão no intervalo entre 0 e 1, inclusive, uma vez que para $q < 0$ seria necessário assumir que ocorrem mudanças no projeto ou substituição de componentes por outros

melhores do que eram quando novos, por exemplo. Além disso, $q > 1$ significa assumir que a manutenção age de forma contrária ao objetivo de retornar o equipamento a uma condição melhor do que estava antes de ser reparado.

Com a apresentação dos conceitos utilizados nesse trabalho, a próxima Seção apresenta uma descrição de como os mesmos serão associadas e aplicadas no caso estudado.

3. Metodologia

De uma forma geral, o processo de desenvolvimento e implantação de um banco de dados de confiabilidade é composto de duas principais etapas:

- Elaboração da Taxonomia do banco de dados para a coleta de informações de campo;
- Obtenção de métricas de confiabilidade a partir dos dados de campo coletados.

3.1. Elaboração da taxonomia;

De acordo com as referências utilizadas, o primeiro passo para elaboração de uma taxonomia consiste na alocação dos equipamentos em grupos e subgrupos com base em níveis hierárquicos. A ISO 14224 (2006) sugere que uma classe de equipamento (bomba, por exemplo) é composta por subunidades (sistema de lubrificação da bomba, por exemplo) que interagem entre si para o funcionamento adequado do equipamento. Cada subunidade, por sua vez, é composta de itens passíveis de manutenção (filtros do sistema de lubrificação, por exemplo), os quais são um conjunto de peças fundamentais (rede do filtro, por exemplo).

É necessário que os dados de RAM sejam associados a um nível dentro da hierarquia taxonômica a fim de serem significativos e comparáveis. Por exemplo, um modo de falha deve estar associado à unidade de equipamento, enquanto que um mecanismo de falha deve estar relacionado ao nível mais baixo atingível na hierarquia de itens. A escolha do nível ou níveis a ser conduzida a análise deve determinar a estratégia de coleta de dados a ser desenvolvida.

Torna-se, então, necessário a definição da fronteira do equipamento, ou seja, a interface entre um equipamento e seus arredores, definindo os limites para os quais os dados serão coletados, ilustrando seus principais itens de nível inferior. De acordo com o manual IAEA (1992), a fronteira definida deve descrever claramente o equipamento, ser compatível com os dados que serão gerados e ser adequada às aplicações do usuário e ser compatível com a documentação do equipamento e suas características operacionais.

Categorias de dados a serem coletados devem ser especificadas e detalhadas para os equipamentos. Para um BDC, três tipos de dados devem ser coletados e armazenados em arquivos específicos. Um referente às características do equipamento em si, outro contendo informações dos eventos de falha (este deve estar relacionado com o primeiro) e outro com dados sobre as atividades de manutenção, seja ela corretiva (neste caso se relacionará com o arquivo de falhas) ou preventiva (neste caso também se relacionará com o primeiro arquivo).

Por fim, Uma análise de falha deve ser realizada com o objetivo de elaborar uma listagem com os modos de falha de todos os equipamentos. O modo de falha é a descrição de um estado falho de um equipamento, ou seja, como podemos observar a falha (Rausand & Oien, 1996) e diversas técnicas são indicadas na literatura para sua identificação. Se os modos de falha não são corretamente identificados, a variação dos dados pode ser grande, resultando em estimativas de confiabilidade de má qualidade (Souza e Droggett, 2003).

3.2. Obtenção de métricas

De posse das informações, inúmeras análises podem ser realizadas desde que o modelo mais adequado seja utilizado. A escolha do modelo a ser utilizado, depende das características operacionais e de manutenção as quais o sistema esta sujeito e do objetivo da análise, além da disponibilidade dos dados. Em se tratando de sistemas reparáveis, sujeitos a reparos imperfeitos, é proposta a aplicação da metodologia PRG para estimação dos parâmetros da distribuição dos tempos de falha e da qualidade dos reparos realizados.

Moura *et al* (2007) afirmam que a escolha do modelo *Kijima tipo I* ou *tipo II* está diretamente relacionada à abrangência de atuação do reparo. Desta forma, fazem as seguintes recomendações:

1. Para componentes individuais o modelo mais apropriado é o *Kijima tipo I* e
2. Para sistemas complexos o mais apropriado é o *Kijima tipo II*.

Uma vez que os modelos PRG não se preocupam com o tempo dos reparos realizados, é importante estimar a distribuição dos tempos de reparo, a partir de técnicas estatísticas, e fazer a devida composição com os parâmetros obtidos com o modelo PRG para obter métricas da disponibilidade do equipamento.

Devido à hierarquização do equipamento na elaboração da taxonomia e a obtenção detalhada de dados, as ferramentas estocásticas referidas serão aplicadas nos componentes do sistema e extrapolados seus resultados para o próprio sistema através de Diagrama de Blocos.

Como este trabalho faz uso de um modelo híbrido estocástico para quantificação das métricas de confiabilidade, não há uma forma analítica de solução facilmente compreensível, fazendo que a solução seja obtida por simulação.

4. Caso de aplicação

Para aplicação da metodologia apresentada, foi considerado um compressor do tipo parafuso utilizado no processamento do gás produzido em uma plataforma fixa marítima, cujos dados foram obtidos do OREDA (SINTEF, 2004).

4.1. Estrutura dos dados, fronteira e modos de falha

Para aplicação das ferramentas quantitativas de estimação de métricas de confiabilidade, foram coletados dados de falha e manutenção do compressor, bem como informações de uso, localização e características específicas do equipamento. Os dados de falha e manutenção foram discriminados para cada subunidade definida como componentes do compressor. A Figura 6 ilustra a fronteira utilizada para a coleta de dados (interior da linha pontilhada), destacando as subunidades definidas para um compressor.

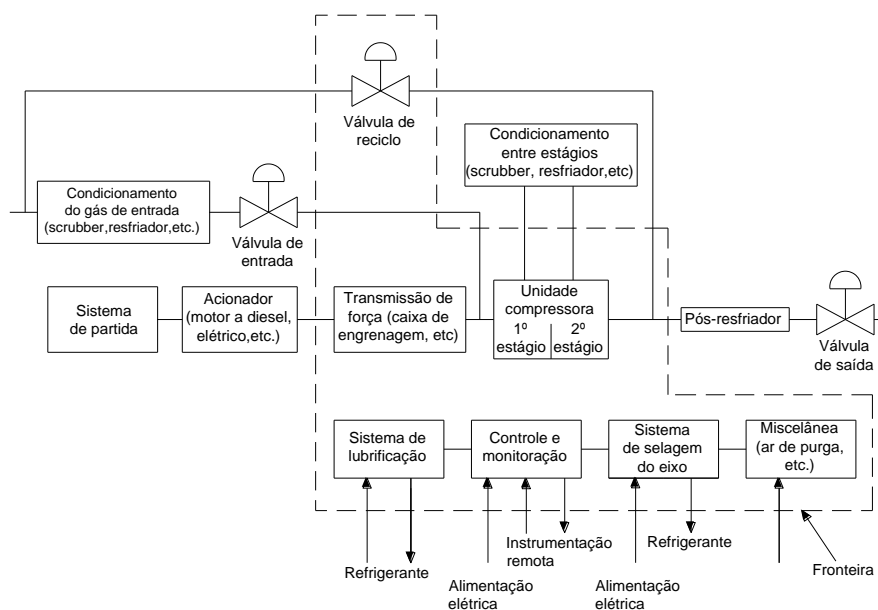


Figura 6 - Definição de fronteiras para compressores.

A subunidade “Miscelânea” satisfaz aos componentes que possam existir no equipamento que não fazem parte das outras subunidades, as demais correspondem às subunidades comumente existentes em compressores.

Os modos de falha identificados em campo, para os quais as apreciações foram realizadas podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Modos de falha identificados em campo.

| Modos de Falha | Descrição |
|---|--|
| Falha na partida sob demanda | Não parte sob demanda |
| Saída baixa | Entrega / Saída abaixo do aceitável |
| Saída errática | Oscilando, buscando, instabilidade |
| Vazamento externo – fluido de processo | Vazamento externo do gás fornecido |
| Vazamento externo – fluido de utilidade | Óleo, gás condensado, água |
| Leitura anormal do instrumento | Alarme falso, indicação falsa do instrumento |
| Parada espúria | Parada inesperada |
| Sobreaquecimento | Partes de máquina, exaustão, etc. |
| Desvio de parâmetro | Parâmetro monitorado excedendo os limites |
| Deficiência estrutural | Danos de material (trincas, desgastes, etc.) |
| Problemas menores em serviço | Itens frouxos, descoloração, sujeira |

4.2. Diagrama de blocos

Como, para o equipamento em questão, um evento de falha registrado em qualquer uma das subunidades definidas na fronteira resulta na sua parada para realização da manutenção corretiva, então todas as subunidades precisam estar operacionais para que o compressor também esteja. Logo, a disposição funcional, em diagrama de blocos, das subunidades para com o sistema compressor é dada em série. A Figura 7 representa o diagrama de blocos para o compressor, onde cada bloco corresponde a uma subunidade.



Figura 7 – Representação das subunidades do compressor por diagrama de blocos dispostos em série.

4.3. Estimação dos parâmetros do PRG e da distribuição dos tempos de reparo

A partir dos dados de falha, a distribuição de probabilidade dos tempos entre falhas foi ajustada a uma Weibull e as estimações dos parâmetros de escala α e forma β , bem como o parâmetro q do rejuvenescimento foram feitas via método computacional desenvolvido por Yañez *et al.* (2002), levando em consideração o modelo *Kijima tipo I* (apenas o efeito da última falha é capturado), para cada subunidade do compressor. O resultado é explicitado na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Tempos de falhas ajustados a uma distribuição *Weibull* via modelagem PRG.

| Subunidade | α (horas) | β | q |
|----------------------------|------------------|---------|-------|
| Unidade de Compressão | 204,918 | 0,959 | 0,609 |
| Controle e Monitoração | 718,543 | 1,023 | 0,829 |
| Sistema de Lubrificação | 346,085 | 0,909 | 0,830 |
| Transmissão de Força | 11,352 | 0,990 | 0,159 |
| Sistema de Vedação do eixo | 10,351 | 1,149 | 0,457 |
| Diversos | 12,002 | 1,071 | 0,514 |

As curvas de distribuição de probabilidade dos tempos de reparo foram ajustadas aos dados pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* (Massey, 1951) e seus parâmetros podem ser vistos na Tabela 3 e na Tabela 4. Para tanto foram considerados os tempos não operacionais das subunidades (*down time*) correspondentes às ações de manutenção realizadas.

Tabela 3 – Tempos de reparo ajustados a uma distribuição *Weibull*.

| Subunidade | α (horas) | β |
|-------------------------|------------------|---------|
| Unidade de Compressão | 191,77 | 0,801 |
| Controle e Monitoração | 139,831 | 1,047 |
| Sistema de Lubrificação | 127,066 | 0,809 |

Tabela 4 - Tempos de reparo ajustados a uma distribuição Lognormal.

| Subunidade | μ (horas) | σ (horas) |
|----------------------------|---------------|------------------|
| Transmissão de Força | 5,780 | 0,354 |
| Sistema de Vedação do Eixo | 5,590 | 0,476 |
| Miscelânea | 4,840 | 0,349 |

4.4. Análise dos resultados

De acordo com os resultados da seção anterior, foram estimadas as curvas de confiabilidade, baseada na equação 3, e disponibilidade de cada subunidade do compressor. Para tanto foram utilizados os conceitos da simulação Monte Carlo (Krivtsov, 2000).

Para cálculo da confiabilidade do compressor ($R_c(t)$), foi considerado um tempo de missão de $t = 8760$ horas (1 ano). De posse da confiabilidade de cada subunidade neste tempo, a métrica $R_c(8760)$ foi obtida a partir da equação 1. A curva da disponibilidade do compressor ($A_c(t)$) ao longo do tempo foi obtida por simulação, fazendo a composição dos parâmetros encontrados nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4. A Figura 8 mostra a curva de disponibilidade média obtida para o compressor.

Considerando um tempo de 8760 horas, os resultados obtidos foram: $R_c(8760) = 0,3835$ e $A_c(8760) = 0,3323$. Portanto, existem 38,35% de probabilidade de o sistema sobreviver a uma missão de 1 ano e a chance de que ele esteja disponível neste período é de 33,23%.

O valor baixo para a confiabilidade é esperado já que o sistema se encontra em série e, para uma missão de 8760 horas, as confiabilidades das subunidades não são altas. Este fato pode ser evidenciado pelo número médio de falhas observadas por ano: 52,75. Ou seja, se o compressor sofre, em média, aproximadamente 53 falhas em um ano, então a sua confiabilidade para o mesmo período é baixa.

Pela curva da Figura 8, nota-se que a disponibilidade do equipamento é igual a 1 no início do período de observação e vai decrescendo até estacionar em torno de 32%. Este comportamento é esperado uma vez que foi considerado que o equipamento iniciou suas operações em $t = 0$ e demora-se certo tempo até que se iniciem os processos de falha de cada subunidade. Este valor estacionário é definido como a disponibilidade média do compressor. Ou seja, espera-se que o compressor opere durante 32% de sua vida útil. Este valor baixo para a disponibilidade média pode ser explicado pelos altos tempos médios de indisponibilidade do equipamento, observados analisando as Tabela 3 e Tabela 4 em comparação com a Tabela 2.

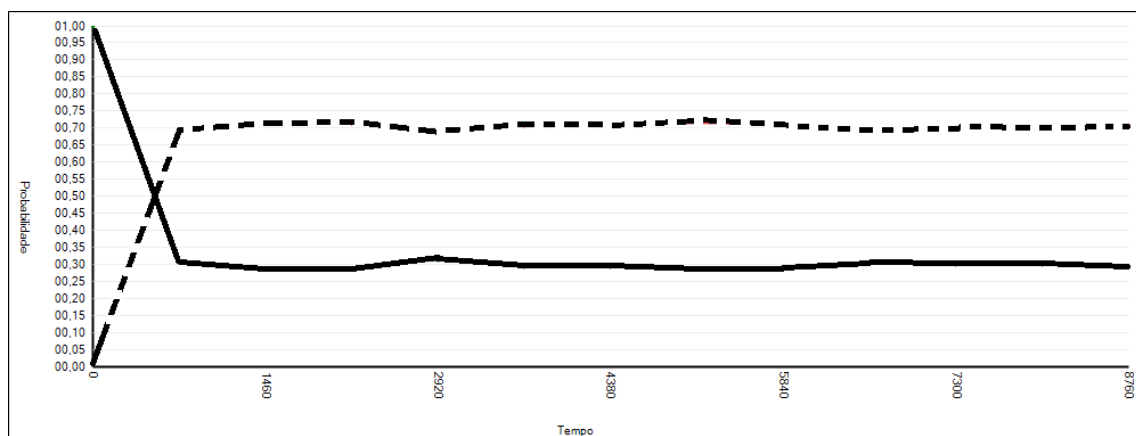


Figura 8 - Disponibilidade (linha contínua) e Indisponibilidade (linha pontilhada) do compressor.

Não foi feita uma análise mais aprofundada do sistema, mas uma justificativa viável ao baixo valor da disponibilidade é a de que o compressor deve operar em paralelo com outro(s), de forma que a ação da manutenção não é considerada urgente, já que o sistema não fica indisponível. Neste caso, a manutenção pode ser realizada em outra oportunidade, elevando o tempo de indisponibilidade do equipamento. A utilização de compressores em paralelo, por sua vez, pode ser justificada pela baixa confiabilidade do compressor. Caso não hajam outro(s) compressor(es) atuando em paralelo, é determinante realizar uma análise aprofundada das causas dos altos tempos de reparo e melhorar a eficiência da equipe de manutenção.

A atestação da eficácia do modelo proposto pode ser verificada comparando a disponibilidade média obtida pelo modelo com a disponibilidade observada nos dados. Pequenas variações dos resultados finais podem ser explicadas pelas variações aleatórias provenientes das simulações.

5. Conclusões

Este artigo apresentou a utilização de uma metodologia qualitativa e quantitativa no contexto de Bancos de Dados de Confiabilidade voltados para a indústria de petróleo e gás. A metodologia para elaboração da taxonomia tomou por base a ISO 14224 (2006). A taxonomia proposta permitiu realizar análises de confiabilidade nas subunidades do equipamento estudado e, para concluir sobre o equipamento em si, foi utilizado DB, onde cada subunidade é um bloco. As análises foram baseadas na ideia dos PRG utilizando a simulação Monte Carlo para encontrar a confiabilidade e a disponibilidade. O modelo foi ilustrado através de uma aplicação.

O PRG permitiu inferir sobre a eficácia das ações de manutenções e avaliar seu impacto sobre a confiabilidade do equipamento, enquanto que a estimação dos tempos de reparo permite concluir sobre a eficiência das ações de manutenção, ou seja, o quão rápido a equipe de manutenção consegue retornar o equipamento ao seu estado operacional. Com isso, é possível obter previsões realísticas do comportamento do equipamento, em termos de confiabilidade e disponibilidade e avaliar procedimentos de manutenção.

O desenvolvimento de um BDC próprio permite a obtenção de métricas realísticas de confiabilidade, além de comportar uma estrutura de dados que permite, através da taxonomia, um melhor entendimento dos eventos de falha e manutenção do sistema, evitando erros de análises provenientes do processo de coleta dos dados. A estrutura taxonômica dos BDC's também permite realizar as análises no nível taxonômico onde se deu o mecanismo que levou à falha, podendo-se concluir sobre o equipamento mediante DB. Por se tratar de um modelo híbrido, sem forma analítica de solução, a simulação se mostra como importante ferramenta de solução.

Por fim, as metodologias utilizadas nesse trabalho mostram ainda que é possível expandir as análises realizadas categorizando os eventos de falha. Por exemplo, podem-se realizar análises separadas por modo de falha e verificar como eles concorrem para ocasionar a falha. Neste caso, ao fim das análises, será preciso montar outro Diagrama de blocos onde cada bloco corresponde a um modo de falha. Outra saída estaria em utilizar os conceitos de Riscos Competitivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio fornecido pelas instituições de pesquisa CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) que contribuem nesse trabalho através de recursos de incentivo ao desenvolvimento da pesquisa.

Referências

Cook, R. e Bedford, T. (2002), Reliability Databases in Perspective. *IEEE Transactions on Reliability*. [S.I.], v. 51, n. 3, p. 294-310.

- Davenport, W. B. J.** *Probability and random process an introduction for applied scientists and engineers*, McGraw-Hill, New York, 1970.
- De Souza, A. N. C. e Droguett, E. L.** (2003), Taxonomia de banco de dados de confiabilidade para a distribuição de gás natural, *Atas do XXIII ENEGEP*.
- Fragola, J. R.** (1996), Reliability and risk analysis data base development: an historical perspective. *Reliability Engineering and System Safety* [S.I.], v. 51, p. 125-136.
- Guo, H. e Yang, X.** (2007), A simple reliability block diagram method for safety integrity verification. *Reliability Engineering and System Safety* [S.I.], v. 92, p. 1267-1273.
- IAEA** (1992), *Manual on reliability data Collection for Research Reactor PSAs*: International Atomic Energy. Viena
- ISO 14224** (2006), *Petroleum and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*: International Organization for Standardization. Switeland
- Kijima, M. e Sumita, N.** (1986), A useful generalization of renewal theory: counting processes goverend by non-negative Markovian increments. *Journal of Applied Probability* [S.I.], v. 23, n. 1, p. 71-88.
- Lisnianski, A.** (2007), Extended block diagram method for a multi-state system reliability assessment. *Reliability Engineering and System Safety* [S.I.], v. 92, p. 1601-1607.
- Massey, F. J.** (1951), The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, v. 46, n 253, p. 68-78.
- Moura, M. C. et al.** (2007), Avaliação Bayesiana da Eficácia da Manutenção via Processo de Renovação Generalizado. *Pesquisa Operacional* [S.I.], v. 27, n. 3, p. 569-589.
- OREDA** (2004), “Offshore Reliability Data Handbook”, 4th edition, SINTEF.
- Rausand, M. e Høyland, A.** (2004), *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*, 2th ed, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- Rausand, M. e Oien, K.** (1996), The basic concepts of failure analysis. *Reliability Engineering and System Safety* [S.I.], v. 53, p. 73-83.
- Ross, S. M.** *Introduction to Probability Models*, 9th. ed, Academic Press, California, 2007.
- WELLMASTER** (1995). User’s Guide and Reliability Data Collection Guidelines for Well Completion Equipment, SINTEF.
- Yañez, M.; Joglar, F. e Modarres, M.** (2002), Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience. *Reliability Engineering and System Safety* [S.I.], v. 77, p. 167-180.