Análise do Risco e da Confiabilidade em Sistemas Complexos

Jorge Roberto Corrêa Bacelo, Wemerson Delcio Parreira

***Resumo*— A detecção e a análise de falhas são procedimentos comuns em sistemas de engenharia. A área da engenharia que analisa a falha e suas consequências é denominada Engenharia de Confiabilidade. A Confiabilidade pode ser definida como a resistência a falha de um item ou sistema sobre o tempo. Outra metologia é o gerenciamento do risco. Esta é um processo sistemático para maximizar eventos positivos e minimizar as consequências negativas dos eventos. Baseado nestes conceitos, este trabalho tem como objetivo definir as diretrizes para análise de falhas em um sistema complexo baseado na análise do Risco e da Confiabilidade.**

***Palavras-Chave*— Confiabilidade, risco, sistema complexo.**

***Abstract*— The failure detection and analysis are common procedures in system engineering. The area of engineering for the failure analysis and its consequences is called Reliability Engineering. Reliability can be defined as the resistance to failure of an item or system over time. Another metodology is the risk management. This is a systematic process in order to maximize the positive events and minimize the consequences of negative events. Based on these concepts this work aims to define the guidelines for failure analysis in a complex system based on analysis of Risk and Reliability.**

***Keywords*— Reliability, risk, complex system.**

I. Introdução

As metodologias para detecção de falhas e análise de seus efeitos têm grande aplicabilidade na industria, por exemplo a melhora do desempenho de produtos, a otimização de seus recursos, a redução dos custos envolvendo paradas inesperadas, entre outros. Desta maneira, pode-se garantir uma maior disponibilidade de equipamentos.

A área voltada para este tipo de análise é denominada Engenharia de Confiabilidade. A partir desta é possível a avaliação de um sistema e seus componentes, investigando as causas de falha e por quanto tempo podem ser operados com segurança. Existem diversas metologias presentes na literatura para o processo de Engenharia de Confiabilidade [1] – [14]. Para o desenvolvimento deste trabalho optou-se pela análise do risco e medida de confiabilidade do sistema.

A análise do Risco é um procedimento, dentro da Engenharia de Confiabilidade, para identificar, caracterizar, quantificar e avaliar os riscos e seu significado. Pode ser expresso a partir da combinação da probabilidade de ocorrência de uma falha, a sua severidade e a probabilidade de detecção dessa falha [3], [4]. Esta técnica possibilita identificar o grau de proteção que os ativos (um equipamento que tem valor potencial para uma empresa) necessitam. Na prática, consiste em verificar a probabilidade de perda causada por uma ameaça contra um bem específico e está associada à possibilidade da perda de algum dos seus princípios, como disponibilidade ou integridade.

Uma outra técnica de uso frequente em Engenharia de Confiabilidade é a análise da Missão de Confiabilidade ou simplesmente Confiabilidade. A Confiabilidade é a probabilidade de quando sob condições pré-estabelecidas, um equipamento ou um sistema desempenhará sua função de forma adequada[1] durante um período de tempo definido previamente [3], [15]. O conceito de confiabilidade está relacionado à otimização do desempenho de componentes e de sistemas, encaixando-se perfeitamente no conceito geral de qualidade.

O foco sobre os problemas e os desafios refere-se à representação de modelagem de sistemas complexos, para sua adequada representação, propagação e quantificação da incerteza no comportamento e modelo das falhas [12]. Segundo Seixas [1], alguns aspectos importantes devem ser considerados quando se calcula o Risco e a Confiabilidade de um sistema complexo: (i) sua natureza probabilística, (ii) sua dependência temporal, (iii) a necessidade do estabelecimento no que se constitua sucesso ou não do sistema, (iv) a necessidade de especificações das condições de operação ou de uso do equipamento.

O fato de serem definidos como uma probabilidade significa que o Risco e a Confiabilidade podem ser expressos quantitativamente, sendo a Confiabilidade uma análise puramente quantitativa [8] e o Risco uma análise quantitativa e qualitativa [16]. A utilização destes conceitos probabilísticos, na prática implica no conhecimento explícito por parte do projetista de que é impossível projetar um sistema inteiramente a prova de falhas. Este trabalho apresenta uma metodologia para o cálculo do Risco e da Confiabilidade, com o objetivo de exclarecer um compromisso entre essas metodologias quando aplicado a sistemas complexos (ou reparáveis).

O trabalho está organizado como se segue. Na Seção II é feita uma revisão a respeito da modelagem estocástica de sistemas complexos. Na Seção III apresenta-se uma conceitualização da análise de Risco. A Seção IV apresenta uma a análise de Confiabilidade para sistemas complexos ou reparáveis, bem como a categorização da confiabilidade. Os resultados e a discussão são apresentados na Seção V. E a conclusão é apresentada na Seção VI.

Jorge R. C. Bacelo e Wemerson D. Parreira, Centro Politécnico, Universidade Católica de Pelotas, Pelotas-RS, Brasil. E-mails: {jorge.bacelo, wemerson.parreira}@ucpel.edu.br .

[1]Em conformidade com as especificações de projeto.

II. Modelagem Estocástica de Sistemas Complexos

Na ocorrência de uma falha em sistemas complexos ou reparáveis há a necessitadade de reparo e não apenas da troca de seus componentes. Diante disso, um estudo de Engenharia de Confiabilidade deve apresentar informações relevantes para se aplicar a reparos e manutenções de forma econômica e otimizada. Assim, modelos para este tipo de sistemas devem descrever as ocorrências de falha no tempo de vida dos componentes diferentemente de sistemas não reparáveis [21].

Para sistemas complexos, em que há uma tendência de mudança na intensidade de falha em relação à idade do sistema, deve-se utilizar o Processo de Poisson Não Homogênio (PPNH) com uma função de intensidade de falha Weibull, dada por (1) [20]:

$$u(t) = \lambda \ \beta \ t^{\beta-1}. \tag{1}$$

em que $u(t)$ é a razão de ocorrência da falha no tempo t; β e λ são os parâmetros do modelo. No PPNH, a função $u(t)$ depende da idade t do sistema, dado que (1) é uma potência do tempo. Neste caso, para $\beta < 1$ a função $u(t)$ é decrescente; para $\beta = 1$ a função é constante e o sistema se comporta como um Processo de Poisson Homogêneo (PPH); e para $\beta > 1$ a função é crescente. Nesta, a função densidade de probabilidade (p.d.f) de Weibull é definida como [18]:

$$f_t(t) = \begin{cases} \lambda \ \beta \ t^{\beta-1} \ \exp(-\lambda t^{\beta}), & t \geq 0 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \tag{2}$$

A partir de (1) é possível obter o número esperado de falhas $N_f(.)$ para um intevalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, fazendo:

$$E[N_f(\Delta t)] = \int_{t_1}^{t_2} u(t) \ \mathrm{d}t. \tag{3}$$

Integrando no intervalo $(0, t_2)$ é possível obter o valor esperado de falhas a partir do tempo $t = 0$. Conhecendo o intervalo de tempo Δt, tem-se que o número de falhas segue um processo de Poisson, com parâmento dado por $\mu_{N_f}(\Delta t) = E[N_f(\Delta t)]$. Desta maneira, obtém-se a probabilidade de se observar exatamente k falhas na média nesse intervalo usando:

$$P[N_f(\Delta t) = k] = \frac{\mu_{N_f}(\Delta t)^k \ \exp\left[-\mu_{N_f}(\Delta t)\right]}{k!}. \tag{4}$$

III. Análise de Risco em Sistemas Complexos

A avaliação dos riscos de um sistema ou equipamento é uma atividade indispensável para mantê-los em bom funcionamento e estabelecer um índice de operação aceitável. Dentre os benefícios deste tipo de avaliação estão a redução de acidentes de processo (tanto em severidade quanto em frequência), o aumento da produtividade, o atendimento a requisitos legais, a otimização dos planos de manutenção, entre outros [17].

O Risco expressa a combinação da probabilidade de ocorrência de uma falha e a severidade das consequências que essa falha venha a causar ao sistema, ao usuário ou ao meio ambiente. Desta maneira o Risco pode ser expresso pela razão entre o Perigo e as Medidas de Controle [3].

O Risco pode apresentar duas dimensões chave: a probabilidade (análise quantitativa) e o impacto (análise qualitativa), em que a probabilidade é a sua chance de ocorrer e o impacto é o seu efeito sobre o objetivo do sistema [19]. O gerenciamento do risco é a técnica usada para minimizar a probabilidade de ocorrência de uma falha ou reduzir a severidade de suas consequências. Uma das metodologias mais utilizadas para este gerenciamento é a FMECA (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*). A partir desta metologia pode-se usar uma relação matemática para expressar o Risco, denominada *Risk Priority Number* – RPN [3]:

$$RPN = O \times S \times D \tag{5}$$

em que O representa a ocorrência da falha, isto é, a probabilidade de uma falha se concretizar; D a detecção[2] da falha que é uma avaliação da probabilidade de se encontrar uma falha antes de sua ocorrência; e S a severidade da falha que é um índice que deve refletir a gravidade da falha sobre o equipamento.

A Eq. (5) pode ser utilizada para quantificar o Risco e também priorizá-lo. E desta maneira, criar uma hierarquia para as falhas, auxiliando em uma estratégia de manutenção.

A probabilidade de ocorrência de falha – $Q(t)$ pode ser calculada a partir da p.d.f de falha de Weibull (2), fazendo:

$$Q(t) = \int_{-\infty}^{t} f_t(t) \ \mathrm{d}t = 1 - \int_{t}^{\infty} f_t(t) \ \mathrm{d}t. \tag{6}$$

Segundo Lafraia [3], $Q(t)$ pode ser classificada de 1 a 10. Essa categorização é feita com o objetivo de mapear com que frequência o modo de falha já ocorreu (ou tem possibilidade de ocorrer). A Tab. I apresenta uma categorização da Ocorrência (O) em função da probabilidade $Q(t)$, que neste trabalho foi dividida em 5 estágios.

TABELA I
Categorização de Ocorrência de Falha em função da Probabilidade.

O	**Nível de Ocorrência**	**Probabilidade**
5	Muito Alta	80% $\leq$ Q(t) $\leq$ 100%
4	Alta	60% $\leq$ Q(t) $<$ 80%
3	Média	40% $\leq$ Q(t) $<$ 60%
2	Baixa	20% $\leq$ Q(t) $<$ 40%
1	Muito Baixa	0% $\leq$ Q(t) $<$ 20%

Outro item relevante ao cálculo do RPN é a Severidade (S). Esse parâmetro é definido a partir de uma análise qualitativa de cada componente do sistema complexo. Para ser usado na Eq. (5) dividiu-se também em 5 estágios, conforme exibe a Tab. II.

Finalmente, a análise qualitativa da probabilidade de Detecção (D) é feita usando os critérios apresentados pela Tab. III. Essa análise envolve os planos de preventiva e preditiva do equipamento.

Assim, com $O, S \in \{1, \ \ldots, \ 5\}$, $D \in \{1, \ \ldots, \ 4\}$ tem-se que $RPN \in \{1, \ 2, \ldots, \ 100\}$. E ainda, quanto menor RPN, menor é o risco de ocorrer uma falha no equipamento. A categorização do RPN é apresentada pela Tab. IV.

[2]Pode-se considerar que a detecção está vinculado a qualidade do plano de manutenção preventiva e preditiva do equipamento.

TABELA II
SEVERIDADE DE FALHA.

S	Nível de Severidade	Descrição
5	Muito Alta	Elementos que se falharem, podem causar um acidente grave ou fatal
4	Alta	Elementos que se falharem, podem causar uma grande perda de produção e/ou gerar um alto custo de reparo.
3	Média	Elementos que se falharem podem, causar uma perda razoável de produção e/ou gerar um custo razoável de reparo.
2	Baixa	Elementos que se falharem podem causar pequena perda de produção e/ou gerar um baixo custo de reparo.
1	Muito Baixa	Elementos que se falharem não causam perda de produção e/ou baixíssimo custo de reparo.

TABELA III
DETECÇÃO DE FALHA.

D	Nível de Detecção	Descrição
4	Baixa	Impossível detectar as falhas
3	Média	Possível detectar algumas falhas
2	Alta	Possível detectar a maioria das falhas
1	Muito Alta	Possível detectar todas as falhas

TABELA IV
CATEGORIZAÇÃO DO RISCO.

Grau de Risco Risco	Categoria	Condição	RPN
I	Crítico	Não Aceitável	$75 \leq RPN \leq 100$
II	Sério	Indesejável	$50 \leq RPN < 75$
III	Moderado	Aceitável com Controle	$25 \leq RPN < 50$
IV	Baixo	Aceitável	$1 \leq RPN < 25$

IV. MISSÃO DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS COMPLEXOS

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é utilizada para determinar as necessidades de manutenção de qualquer ativo físico no seu contexto operacional [9]. Trata-se de um processo lógico de análise e decisão para determinar a tática ótima de manutenção [4], [10]. Desta maneira, torna-se uma ferramenta útil para assegurar que um sistema (ou um componente) continue a preencher as suas funções requeridas [3].

Para a MCC é relavante a probabilidade de que um dado item do sistema sobreviva em um intervalo preestabelicido. Esta probabilidade de sobrevivência é denominada de Confiabilidade – $R(t)$ e é dada por (7) [2]:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)\ dt = 1 - Q(t). \tag{7}$$

Para se obter a curva com o comportamento de $R(t)$ de um sistema complexo, deve-se calcular a probabilidade de que um sistema de idade t complete um operação de duração fixa T com sucesso. Considerando que o sistema é reparável e as falhas que o afetam seguem um PPNH, a probabilidade de que um sistema com idade t não falhe em $(t,\, t + \Delta t)$ é dada por [20] :

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left[\int_t^{t+\Delta t} u(\tau)\ \mathrm{d}\tau\right] \\ &= \exp\left\{-\left[\lambda\,(t+\Delta t)^{\beta} - \lambda t^{\beta}\right]\right\}. \end{aligned} \tag{8}$$

Em sistemas reparáveis, os dados de falha são coletados no momento em que o sistema está em funcionamento. Sendo que, essas falhas são geradas por todos os itens que compõem o sistema reparável. E ainda podem acontecer em diferentes momentos.

Suponha que o q-ésimo componente de um sistema seja observado em um tempo T a partir do tempo $t = 0$. Os estimadores de máxima verossimilhança de β e λ da função de intensidade de Weibull são dadas por $\hat{\beta}$ e $\hat{\lambda}$ respectivamente [20]:

$$\hat{\beta} = \frac{\displaystyle\sum_{q=1}^{k} N_q}{\displaystyle\sum_{q=1}^{k}\sum_{i=1}^{N_q} \log\frac{T}{\tau_{iq}}} \quad \text{e} \quad \hat{\lambda} = \frac{\displaystyle\sum_{q=1}^{k} N_q}{k\ T^{\hat{\beta}}} \tag{9}$$

em que N_q é o número de falhas do q-ésimo componente do sistema, com $q = 1, 2, ..., k$ e τ_{iq} é o tempo de ocorrência da falha.

Para que fosse possível confrontar $R(t)$ com RPN em função do tempo e determinar em que condição um dado sistema se encontra, foi criada uma categorização para a Confiabilidade, Tab. V em igual número de categorias do RPN.

TABELA V
CATEGORIZAÇÃO DA CONFIABILIDADE.

Grau de Conf.	Categoria	Condição	Confiabilidade
I	Crítico	Não Aceitável	$1 \leq R(t) \leq 25$
II	Sério	Indesejável	$25 < R(t) \leq 50$
III	Moderado	Aceitável com Controle	$50 < R(t) \leq 75$
IV	Alto	Aceitável	$75 < R(t) \leq 100$

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para um estudo de caso, foi simulado um sistema complexo com 7 componentes. Os tempos de falha ao longo de 2000 h de observação de cada um dos componentes do sistema estão listados na Tab. VI.

A partir da Tab. VI e (9) obtem-se os estimadores de máxima verossimilhança para β e λ, que são: $\hat{\beta} = 1,81$ e $\hat{\lambda} = 3,6167 \times 10^{-6}$. Assim, a estimativa da função razão de ocorrência da falha é $\hat{u}(t) = (6,5462 \times 10^{-6})\ t^{0,81}$, ver Eq. (1).

Neste sistema a estimativa do número médio de falhas em um intervalo $(0, t)$ pode ser obtido por (3) e é $\hat{\mu}_{N_f}(t) = (3,6167 \times 10^{-6})\ t^{1,81}$. A Fig. 1 apresenta o comportamento do número médio de falhas em função do tempo.

Para fins de simulação dos modelos, a Confiabilidade é obtida para um período de tempo $\Delta t = 300$ h em (8) . Como

TABELA VI

DADOS DE FALHA DISTRIBUÍDA AO LONGO DE 2000H.

Falha	Equipamento						
	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7
1	152	52	208	104	1248	1092	572
2	312	468	520	260	1404	1664	1352
3	416	832	728	624			
4	676		884	780			
5	988			936			
6				1612			

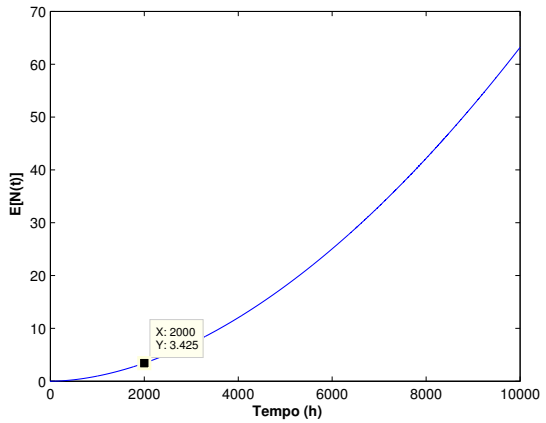

Fig. 1. Comportamento médio de falhas do sistema ao longo de 10.000 h.

$\beta > 1$ tem-se uma intensidade de falha, $u(t)$, crescente e portanto a Confiabilidade – $R(t)$ é decrescente. A Fig. 2 exibe a evolução da Confiabilidade numa previsão para 10.000 h.

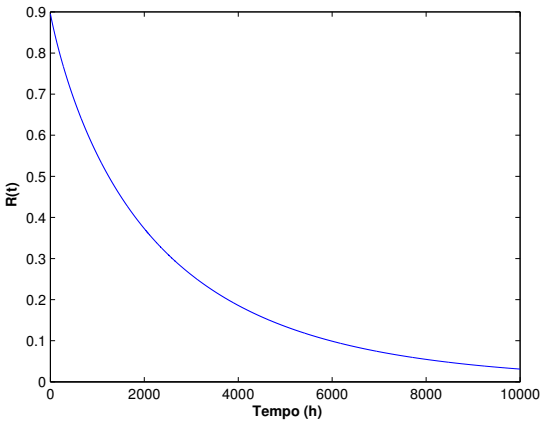

Fig. 2. Estimação da Confiabilidade – $R(t)$ para 10.000 h.

Para o cálculo do Risco foram simulados dois cenários distintos. O primeiro leva em consideração $S = 5$, $D = 3$ e O variando em função do tempo utilizando (6) e Tab. I. Neste caso, a evolução do RPN em função do tempo apresenta um comportamento exibido pela Fig. 3.

A Fig. 4 mostra a evolução do $R(t)$ e do $RPN(t)$ em função do tempo. Na Tab. VII é possível realizar a comparação do grau apresentado pelos dois modelos. Desta maneira, considerando uma severidade $S = 5$ e uma detecção D = 3, nota-

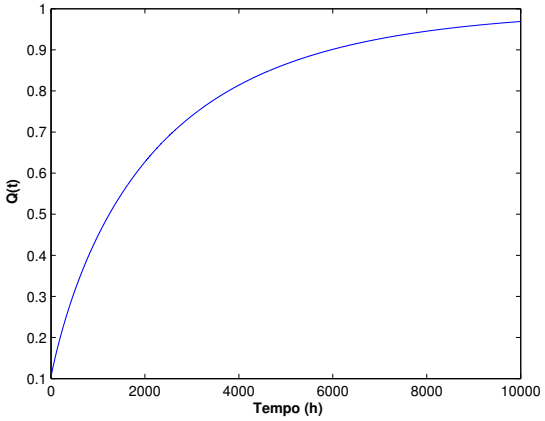

Fig. 3. Gráfico da Probabilidade de Falha – $Q(t)$ para 10.000 h.

se que o comportamento das categorias de $R(t)$ e $RPN(t)$ são os mesmos até 4.000 h. A partir de 4.000 h a confiabilidade apresenta uma condição "Não Aceitável" (Grau I) e o Risco se mantém em "Indesejável" (Grau II). Embora ocorra diferença nos indicadores, o alto índice de criticidade exige uma tomada de decisão semelhante.

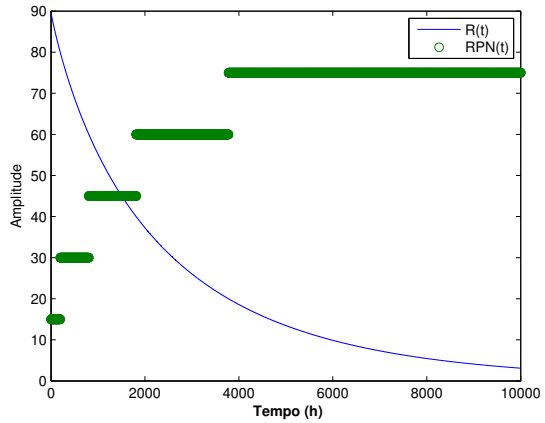

Fig. 4. Variação de $R(t)$ e $RPN(t)$ com $S = 5$ e $D = 3$ ao longo de 10.000 h.

TABELA VII

COMPARAÇÃO ENTRE $R(t)$ E $RPN(t)$, SENDO S = 5 E D = 3.

Tempo		$R(t) \times RPN(t)$	Grau
750h	$R(t)$	61,74	III
	$RPN(t)$	30	III
1500h	$R(t)$	45,07	III
	$RPN(t)$	45	III
3000h	$R(t)$	26,07	II
	$RPN(t)$	60	II
4000h	$R(t)$	18,61	I
	$RPN(t)$	75	II

Um outro cenário é obtido a partir da variação da Detecção para $D = 1$. A Tab. VIII apresenta a evolução das duas metodologias $R(t)$ e $RPN(t)$. É possível notar que o Fator

de Risco definido por $RPN(t)$ se mantém constante em Grau IV (Aceitável). Mesmo com uma severidade $S = 5$, tem-se que: se a falha é de fácil detecção, para qualquer índice de Severidade ou de Ocorrência, o $RPN(t)$ se mantém constante em nível aceitável.

TABELA VIII
COMPARAÇÃO ENTRE $R(t)$ E $RPN(t)$, SENDO S = 5 E D = 1.

Tempo		$R(t) \times RPN(t)$	**Grau**
750h	$R(t)$	61,74	III
	$RPN(t)$	10	VI
1500h	$R(t)$	45,07	III
	$RPN(t)$	15	VI
3000h	$R(t)$	26,07	II
	$RPN(t)$	16	VI
4000h	$R(t)$	18,61	I
	$RPN(t)$	25	VI

É possível verificar que se o sistema reparável possui uma confiabilidade baixa (Não Aceitável) significa que a probabilidade deste não cumprir sua função no tempo estabelecido é alta. Se o equipamento em questão for de grande relevância para a operação, o fato de se ter um Fator de Risco baixo, devido a Detecção, não isenta uma atenção maior da equipe de manutenção. Neste caso a análise da Confiabilidade será a mandatória para uma intervenção (ou um plano de ação).

A partir dos resultados apresentados nesta seção pode-se considerar que as metodologias de análise da Confiabilidade usando $R(t)$ e análise de Risco por $RPN(t)$ se complementam em sistemas complexos.

Assim, a Fig. 5 apresenta a diretriz proposta para um projeto de Engenharia de Confiabilidade em Sistemas Complexos baseando-se em $R(t)$ e $RPN(t)$.

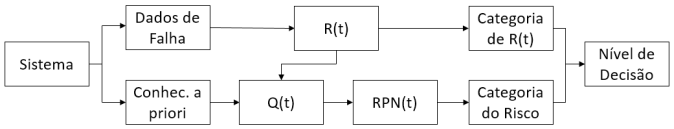

Fig. 5. Diretrizes para um estudo de Engenharia de Confibilidade.

VI. CONCLUSÕES

Exitem diversas metologias na literatura para análise e previsão de falhas. Este trabalho trata a análise do histórico de falhas em um sistema complexo para aplicação no cálculo da Missão de Confiabilidade e do Risco.

No sentido de Engenharia de Confiabilidade apresentou-se evidências que tais metologias são complementares. Enquanto a Confiabilidade é uma medida puramente quantitativa avaliando a resitência a falha de um equipamento, o Risco pode ser visto como uma análise quantitativa e qualitativa considerando não apenas a probabilidade do sistema ou equipamento falhar em período de tempo, como também um conhecimento a priori do projetista (ou engenheiro). Dado que, neste caso, trata-se da ponderação de escolha entre um cálculo que exige apenas o registro do histórico de falha do sistema ou componente, $R(t)$, e um cálculo que além do registro de falha necessita do conhecimento empírico deste, $RPN(t)$.

A partir dos registros do ciclo de vida, do conhecimento do equipamento e dos modelos probabilísticos, é possível obter informações que servem como subsídios para tomada de decisão de intervenção do sistema. Nesse sentido, a compreensão do Risco e da Confiabilidade mostram-se indispensáveis no tratamento de falhas e são condições básicas de conhecimento ao profissionais que atuam na gestão ativos e nas áreas relacionadas.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Católica de Pelotas pelo incentivo à pesquisa e ao Terminal de Contêineres de Rio Grande – Tecon RG pelo apoio para o desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS

[1] E. S. Seixas, *Engenharia de Confiabilidade na Manutenção*. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
[2] I. P. Siqueira, *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação*, Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2012, 408p.
[3] J. R. B. Lafraia, *Manual de confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade*, Rio de Janeiro: Qualitymark Editora: Petrobrás, 2014, 388p.
[4] J. L. O. Raposo, *Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada a Sistemas Elétricos - Uma Proposta para Uso de Análise de Risco no Diagrama de Decisão*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, 2004.
[5] R. A. Wuttke, *Cálculo da Disponibilidade e da Posição na Curva da Banheira de uma Válvula de Processo Petrquímico*, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, 2008.
[6] M. Sellito, "Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos",Produção, v.15, n.1, p.44-59, 2005.
[7] C. L. Cavalca, *Confiabilidade em Engenharia*, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Novembro de 2000.
[8] P. D. T. O'Connor, D. Newton, R. Brombley, *Practical Reliability Enginneering*, 3th. ed. rev. Chicherter: JohnWiley & Sons, 1998.
[9] J. Moubray, *Reliability centered maintenance*, London: Butterworth Heinemann, 1992.
[10] D. C. Johnston, "Plausible reasoning theory in reliability centered maintenance analysis", Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002b, IEEE. Proceeding: IEEE, 2002. P. 367-371.
[11] B. S. Hauge, D. C. Johnston, "Reliability centered maintenance na risk assessement", In: Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002b, IEEE. Proceeding: IEEE, 2001. P.36-40.
[12] E. Zio, *Reliability engineering: Old problems and new challenges, Reliability Engineering and System Safety* , 1994 (2009) 125-141. s
[13] P. E. Richter, *Análise de Confiabilidade no Desenvolvimento de Tratores Agrículas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2006.
[14] R. C. Fonte, "Aplicação Combinada de Modelos de Risco de Falha de Sistemas Reparáveis e Não Reparáveis para Cálculo da Confiabilidade de Equipamentos", XX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009.
[15] F. P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries*, 1st. ed. rev. Atual. London, UK: Butterworth-Heinemann, 1991.
[16] T. Aven, "The risk concept - historical and recent development trends", *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 33–44, 2012.
[17] T. AVEN. "Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation", *European Journal of Operational Research*, pp. 1 – 13, 2016.
[18] A. PAPOULIS, S. U. PILLAI, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 4ªed, Mc Graw Hill, 2002
[19] P. C. Dismore, A. Cavalieri, *Gerenciamento de Projetos*, 4a. ed., Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.
[20] L. J. Crow, *Reliability analysis for complex, repairable systems, technical report*, AMSAA, Army Materiel Systems Analysis Activity, 1975.
[21] G. R. Weckman, R. L. Shell, J. H. Marvel, "Modeling the reliability of repairable Systems in the aviation industry ", *Computer & Industrial Engineering*, v.40 51-63, 2001.
[22] W. B. Santos, S. B. Motta, A. Colosimo, "Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório", *Gestão & Produção*, v.14 n.1, São Carlos, 2007.
[23] G. L. Gilardoni, E. A. Colosimo, "Optimal Maintenance Time for Repairable Systems", *Journal of Quality Technology*, v.38 n.4, 2006.