Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação metal-mecânica baseada em cálculos de confiabilidade de equipamentos

Data de recebimento: 15/01/2007
Data de aprovação: 05/02/2007

Miguel Afonso Sellitto (UNISINOS-RS) – sellitto@unisinos.br
• Rua José Bonifácio, 910, Apto. 202 – CEP 93010-180 – São Leopoldo-RS

Resumo
Este trabalho relata uma análise estratégica da manutenção de uma linha de produção, com base em estudos de confiabilidade sistêmica e de equipamentos individuais. Inicia-se descrevendo algumas das características do uso da confiabilidade na manutenção industrial e, a seguir, se descreve um estudo de caso realizado em manufatura, aplicando técnicas de confiabilidade para a formulação de estratégias de manutenção da fábrica. Com base nos resultados obtidos, robustece-se o método, identificam-se requisitos para sua aplicação e conclui-se sobre o uso da confiabilidade como teoria subjacente ao processo de formulação de estratégias de manutenção. Também, fazem-se considerações, ligando objetivos de uma estratégia de manutenção com os objetivos de uma estratégia de manufatura, que, por sua vez, deve contribuir para a obtenção dos objetivos de negócio da empresa.
Palavra-chave: *Estratégia de manutenção; Estudo de caso em manutenção; Confiabilidade em manutenção industrial; Confiabilidade de equipamentos; Análise de Weibull em manutenção.*

Abstracts
This paper reports a strategic analysis performed on the maintenance of a production line, based on studies of systemic and isolated equipment reliability xx. It starts describing some characteristics of the use of reliability in industrial maintenance and then xx a case in manufacture, by applying reliability techniques in the formulation of strategies for factory maintenance. With basis on the obtained results, xx the method is strenghtened, xx the requirements for the application are pinpointed and the conclusions about the use of reliability as an underlying theory to the maintenance strategy formulation process are reached. Also, xx considerations linking manufacturing strategy goals with maintenance strategy goals are drawn, which in turn, must contribute to the obtainment of the enterprise's business goals xx.
Keywords: *Maintenance strategy; Case study in maintenance; Reliability in industrial maintenance; Equipment reliability xx; Weibull analysis in maintenance.*

GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas – Ano 2, vol. 3, mai-jun/07, p. 97-108

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A função manutenção tem se transformado e tem evoluído, à medida em que os gestores das organizações industriais têm se apercebido o quanto as falhas em equipamentos afetam a segurança, a qualidade e os custos da produção. Segundo Moubray (1996), gestores de manutenção têm adotado novos modos de pensar, tanto no papel de técnicos como no papel de estrategistas, ao mesmo tempo em que as limitações dos sistemas de gestão existentes se tornam mais visíveis.

Uma modificação nos atuais sistemas de gestão da manutenção industrial, que pode ser proposta, é a formulação de uma estratégia formal de manutenção, cujas crenças subjacentes sejam fundamentadas na teoria da confiabilidade. Tal formulação pode ser uma alternativa às estratégias informais encontradas nas empresas, formuladas com base nas convicções e na experiência pessoal de gestores. Em relação a este tipo de estratégia, Elsayed (1996) invoca o papel do projeto do equipamento industrial, na especificação do objetivo de confiabilidade na manutenção, o que torna relevante o uso desta teoria na formulação de uma estratégia de manutenção ou de gestão do ciclo de vida de equipamentos industriais.

Entende-se que os objetivos de confiabilidade e de disponibilidade, em uma instalação industrial, sejam decorrência das decisões tomadas na fase de projeto da instalação. É muito difícil um gestor de manutenção aumentar a confiabilidade de equipamentos (a probabilidade que opere sem falhas até o tempo t), cujo projeto não permita soluções aumentantes, tais como redundâncias de itens ou troca de peças frágeis por outras mais robustas. Também é muito difícil que um gestor de manutenção aumente a manutenibilidade de um equipamento (a probabilidade que, dado que uma falha ocorreu, esta seja corrigida até o tempo t) se algumas diretrizes não tenham sido adotadas na fase do projeto, tais como facilitar o acesso às peças frágeis ou prever pontos de concentração de fragilidades, os fusíveis mecânicos. Tal noção reforça a importância de se adotarem objetivos de confiabilidade e de manutenibilidade na fase de projeto de equipamentos complexos industriais.

Equipamentos complexos industriais são arranjos de itens, componentes e sub-sistemas, com metas de desempenho, confiabilidade e manutenibilidade. Definida a função do sub-sistema e especificados os componentes e itens, o projetista calcula a confiabilidade esperada e identifica a importância dos componentes para esta confiabilidade. Se necessário, aloca redundâncias ou paralelismos até atingir o objetivo de confiabilidade, se possível, sem prejuízo de outros objetivos, como custo e desempenho (Lafraia, 2001; Elsayed, 1996). O projetista também deve, através de técnicas, tais como o FMEA, identificar os modos de falha e prever soluções para que, admitida a quebra, esta seja pouco severa e o reparo se dê no menor tempo possível. A complexidade do equipamento manifesta-se pelos infinitos modos de falha possíveis e pelas interferências mútuas que os modos exercem entre si.

Definido o projeto, à manutenção cabe manter ou, eventualmente, recuperar o desempenho original, tanto em custo como em funcionalidade. A capacidade da manutenção de modificar o desempenho insatisfatório de um equipamento é, portanto, limitada. A partir de um certo ponto na vida de um equipamento, ou se reduz a expectativa de desempenho ou se introduzem modificações importantes no projeto, que podem ser baseadas na experiência adquirida pela manutenção ao longo do tempo de operação. O conhecimento do trecho de vida em que se encontra o equipamento, pode ser importante para a formulação de uma estratégia de manutenção ou de gestão do ciclo de vida de equipamentos complexos industriais.

O objetivo deste trabalho é descrever um estudo de caso, cujo objetivo foi testar um método para a formulação de estratégias de manutenção para os equipamentos complexos industriais, de uma linha de produção metal-mecânica, com base na determinação do trecho do ciclo de vida em que estes se encontram. Também, foram calculadas as manutenibilidades e disponibilidades dos equipamentos e a confiabilidade sistêmica da linha de produção e apontadas alocações para eventuais aumentos de confiabilidade. A motivação da pesquisa é incluir a manutenção industrial como fonte de vantagem competitiva em manufatura para empresas, cujo processo de geração de valor inclua equipamentos complexos industriais, tais como,

máquinas de alta tecnologia e sistemas combinados em linhas complexas de produção. O restante do artigo está organizado em uma revisão bibliográfica sobre temas de referência, apresentação do caso, discussão e encaminhamento de conclusões e trilhas para a continuidade de pesquisa.

2. CÁLCULO DE CONFIABILIDADE E MANUTENIBILIDADE DE EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO

O conceito de confiabilidade foi introduzido na manutenção por um trabalho seminal sobre falhas em equipamentos eletrônicos de uso militar, nos anos 1950, nos Estados Unidos. A tarefa foi conduzida por um grupo de estudos da *Federal Aviation Administration*, para a indústria aeronáutica, cujas conclusões reorientaram os procedimentos de manutenção até então vigentes (Moubray, 1996): (i) se um item não possui um modo predominante e característico de falha; revisões programadas afetam muito pouco o nível de confiabilidade deste item; e (ii) para muitos itens, a prática de manutenção preventiva não é eficaz.

Segundo a NBR 5462-1994-2.2.6 4 (1994), a confiabilidade de um item é a probabilidade de que este item possa desempenhar sua função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso. Nesta definição, o termo probabilidade indica a razão entre os números de casos favoráveis e de casos possíveis, o termo função requerida indica o patamar abaixo do qual a função do equipamento não é mais satisfatória e o termo condições definidas de uso indica as condições ambientais, grau de severidade e solicitações mecânicas, físicas, químicas. Quando um item não executa a função requerida, respeitadas as condições definidas, tem-se uma falha.

Outra definição de confiabilidade é encontrada em Elsayed (1996). Para um item cujo reparo é impossível, tal como um satélite artificial, a confiabilidade é a duração esperada de desempenho sem falhas, sob condições de projeto. Para itens reparáveis, como equipamentos industriais, a confiabilidade é a probabilidade de desempenho sem falhas durante um dado intervalo de tempo, sob as condições de projeto. Esta definição torna a confiabilidade uma função R(t), em que o valor varia entre 0 e 1. Em ambos os casos, a confiabilidade pode ser usada como medida do sucesso de um projeto no cumprimento de uma missão (Elsayed, 1996).

O tempo até a falha de um componente ou sistema é uma variável aleatória, e segue uma distribuição de probabilidade. Se X_t for uma variável aleatória representando o tempo até a falha de um equipamento, a função confiabilidade R(t) no instante t, é dada por (1). Se houver uma expressão analítica f(t), que descreva a densidade de probabilidade de X_t, vale (2).

$$R(t) = \text{Probabilidade } [Xt > t] \tag{1}$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(\zeta) d\zeta \tag{2}$$

A função R(t) oferece parâmetros para a medição do sucesso de um projeto: (i) para itens não-reparáveis e que, portanto, falham apenas uma vez, o MTTF (*mean time to failure* – tempo médio até a falha); e (ii) para itens reparáveis cujo resultado do reparo pode ser considerado tão bom quanto novo, o MTBF (tempo médio entre falhas). A função manutenibilidade M(t), homóloga a R(t), porém tratando do tempo até o reparo, em vez do tempo até a falha, oferece outro parâmetro, para a medição do sucesso de um projeto, o MTTR (*mean time to repair* – tempo médio até o reparo). Ambos os parâmetros, combinados, oferecem um parâmetro maior para a medição do sucesso do projeto, a disponibilidade. Este parâmetro pode realimentar o projeto de equipamentos complexos e instalações industriais, pois, além da resistência ao

processo de falha, apreendida no MTBF, considera a facilidade de reparo, apreendida no MTTR. A forma de medição da disponibilidade, que mais interessa para os equipamentos industriais, é dada pela equação 3 (Elsayed, 1996).

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{3}$$

Um modo de obter a função confiabilidade, em sistemas complexos industriais reparáveis, é a análise de Weibull. A análise é útil em sistemas reparáveis complexos, que podem falhar, segundo um número infinito de modos de falhas que competem entre si. O modelo de Weibull explica o comportamento de sistemas, cuja falha nasce da competição entre diversos modos de falha, o que ocorre se eles atuarem em série, competindo pela falha (primeiro a ocorrer, ocorre a falha), como em equipamentos industriais (Lewis, 1996). Outros modelos podem explicar outros comportamentos sistêmicos. Se a falha ocorre, quando o último item falha, o modelo gamma pode ser usado. Se a falha resulta da soma ou da multiplicação das ações de infinitos modos ou mecanismos de falha, os modelos normal e lognormal, respectivamente, podem ser usados (Hahn e Shapiro, 1967).

Para o objetivo deste artigo, o modelo de Weibull é o mais adequado.

A análise de Weibull foi concebida pelo físico sueco Waloddi Weibull, em 1937 e foi publicada no Journal of Applied Mechanics da American Society of Mechanical Engineering, em 1951, com o seguinte formato (Sellitto, Borchardt e Araújo, 2002): (i) Coleta de amostras de tempos até a falha do objeto; (ii) Plotagem dos tempos em papel de probabilidade ou uso de *software* estatístico, para ajuste à distribuição de Weibull e estimativa de seus parâmetros; (iii) Não havendo ajustes ou há mistura de dados, (dados provêm de mais de uma população) ou outra distribuição deve ser tentada; (iv) Uso dos parâmetros da distribuição para previsão do tipo de comportamento das falhas; e (v) Uso de cálculos econômicos, envolvendo custos e riscos para gerar ações corretivas, como políticas de inspeção, reparos ou trocas.

O modelo de Weibull a três parâmetros é descrito pelas equações 4 e 5, respectivamente a função confiabilidade e o MTBF (tempo médio entre falhas). Outras funções, tais como a taxa de risco h(t) e a densidade de probabilidade de falhas f(t), podem ser obtidas por relações descritas na teoria da confiabilidade, mas sem interesse para este artigo. Os parâmetros da distribuição são: (i) t_0 = parâmetro de localização (tempo isento de falhas); (ii) θ = parâmetro de escala (intervalo de tempo após t_0, no qual ocorrem 63,2% das falhas); e (iii) γ = fator de forma (aponta o complexo comportamento combinado dos modos de falha). O comportamento das falhas segue padrões, que podem ser classificados segundo o fator de forma: (i) $\gamma < 1$: taxa de falhas decrescente, o que indica mortalidade infantil; (ii) $\gamma = 1$: taxa de falhas constante, o que indica falhas aleatórias ou zona de maturidade; e (iii) $\gamma > 1$: taxa de falhas crescentes, o que indica falha por fadiga ou mortalidade senil do item (Sellitto, 2005).

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{\left(\frac{t - t_0}{\theta}\right)^{\gamma}} \tag{4}$$

$$MTBF = t_0 + \theta.\Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \tag{5}$$

Obtidas as confiabilidades dos equipamentos individuais, calcula-se a confiabilidade de sistemas de produção, o que depende do modo como estes são arranjados. Embora haja outras configurações, duas são suficientes para descrever a maioria dos sistemas industriais: a conexão série e a conexão paralela. Outras conexões são raras de se encontrar na prática e exigem técnicas mais avançadas de cálculo da confiabilidade, descritas em Elsayed (1996).

Sejam dois equipamentos A e B. A conexão série ocorre quando a entrada do conjunto é ligada à entrada de A, a saída de A é ligada à entrada de B e a saída de B é a saída do conjunto. A conexão paralela

ocorre quando a entrada do conjunto é ligada às entradas de A e de B e a saída do conjunto é ligada às saídas de A e de B. O raciocínio é extensível a n componentes e o cálculo da confiabilidade, em série e em paralelo, é apresentado nas equações 6 e 7 (Elsayed, 1996).

$$Rsérie = \prod_{i=1}^{n} R(n) \tag{6}$$

$$Rparalelo = \left[1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R(n))\right] \tag{7}$$

3. A PESQUISA: MÉTODO, RESULTADOS, DISCUSSÃO

Um fator que influencia a competitividade em manufatura de empresas de base tecnológica, cujos processos de geração de valor usam equipamentos complexos de produção, é a gestão da manutenção. A formulação estratégica da manutenção deste tipo de equipamento é uma das maneiras pelas quais uma empresa pode usar a manutenção, para adquirir ou manter uma vantagem competitiva, que a manufatura possa representar no ambiente de negócios. Exemplos de vantagens competitivas que podem ser adquiridas por uma estratégia consistente de manutenção, são: (i) obtenção de uma disponibilidade maior do que as de concorrentes em equipamentos complexos, que sejam gargalo em indústrias de processamento contínuo relativamente padronizados, ou seja, todos os concorrentes têm o mesmo gargalo; (ii) obtenção de confiabilidade maior (MTBF maior) do que as dos concorrentes em indústrias sazonais, nas quais a entrega fora da estação de vendas, significa perda irreparável ou em indústrias nas quais a competição se dá com base na rapidez e na confiabilidade das entregas; ou (iii) obtenção de manutenibilidade maior (MTTR menor) do que as dos concorrentes em indústrias pesadas, nas quais o custo de manutenção é parte relevante do custo do produto e a competição se dá com base no preço de venda.

Entende-se que um método de pesquisa adequado para tal objetivo, é o estudo de caso descritivo. A teoria do método do caso surge em Yin (2001). Considerações acerca do método do caso em operações industriais, surgem em Voss; Tsikriktsis e Frohlich (2002). A seqüência de casos pode conduzir a uma teoria fundamentada (*grounded theory*), tal como proposto em Eisenhardt (1989). Os objetivos de pesquisa foram: (i) exercitar o método de formulação, tal como concebido teoricamente; (ii) enriquecer a coleção dos casos que podem compor a teoria fundamentada; e (iii) criar um caso robusto, mais do que exploratório, para uso no PPGEPS.

Antes do planejamento do caso, levantou-se, por pesquisas qualitativas com gestores de manutenção de empresas compatíveis com o caso, que as estratégias de manutenção industrial, geralmente são estabelecidas por métodos subjetivos, tais como: em equipamentos críticos se faz manutenção preventiva; em equipamentos ociosos se admitem emergências; em equipamentos redundantes se faz manutenção corretiva. O objetivo principal do caso foi testar critérios objetivos para a escolha da estratégia de manutenção. Outras exigências foram: (i) a gestão da manutenção deve ser relevante para o resultado da empresa; (ii) a gestão estratégica deve incluir modificações conceituais na empresa; (iii) o estudo deverá ser estruturado, replicável e contributivo para o estado-da-arte da linha de pesquisa em questão.

A questão de estudo foi: é possível formular estratégias de manutenção por métodos objetivos? Proposições de estudo também foram colocadas: (i) métodos objetivos para a formulação de estratégias de manutenção são aplicáveis em ambiente industrial? (ii) que requisitos são necessários para a adoção destes métodos? e (iii) que evidências são necessárias para a comprovação da eficácia destes métodos?

A unidade de estudo foi uma das plantas metal-mecânicas de uma fábrica participante da cadeia de suprimentos da indústria automobilística do RS, cujo processo de produção foi mapeado e os equipamentos foram identificados e agrupados em unidades. Por fim, foram definidos os dados a coletar: os tempos até a

falha e os tempos até o reparo das máquinas. Estes dados são suficientes para o cálculo do fator de forma γ, que identifica o ponto do ciclo de vida em que o equipamento se encontra, ao longo da curva da banheira. Conhecendo-se este ponto, é possível estabelecer uma estratégia de manutenção para cada máquina.

Finalmente, planejou-se o método de trabalho. Foi necessário o uso dos *softwares* ProConf 98 e ProSys 98. Coletaram-se os dados no sistema de informações de manufatura da empresa e modelaram-se os mesmos, com a ajuda dos *softwares* mencionados, obtendo-se as funções de confiabilidade e MTTR de máquinas, suas disponibilidades e a confiabilidade do sistema de produção. Foram calculados intervalos ótimos de intervenção nas máquinas em mortalidadae senil. Ao fim, calcularam-se as alocações ótimas de confiabilidades aumentadas.

3.1. Resultados da pesquisa

Foi escolhida uma complexa linha de produção de uma manufatura pertencente à cadeia automobilística. O sistema produtivo estudado é composto por seis unidades produtivas, cada uma delas composta por diversos equipamentos industriais, com infinitos modos de falha. O sistema produtivo pode ser simplificado e foi mapeado, conforme a figura 1.

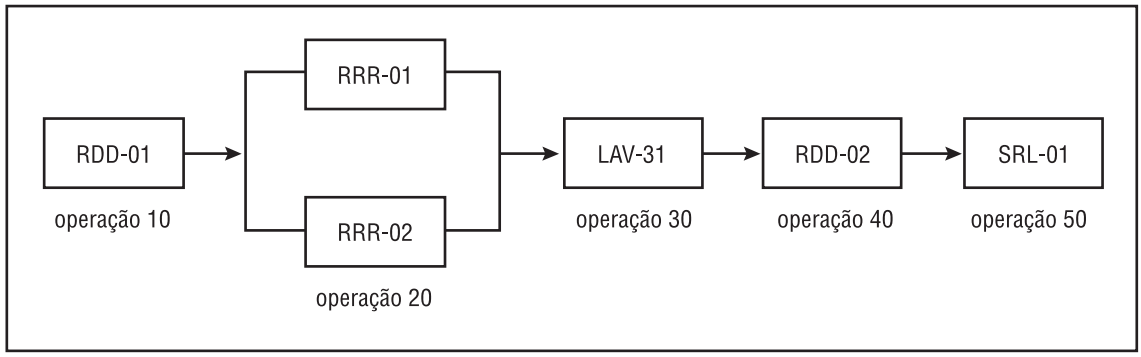

FIGURA 1 – Sistema produtivo estudado.

A tabela 1 mostra os tempos até a falha das seis máquinas e as distribuições de probabilidades ajustadas pelo Proconf 98, pelo método da máxima verossimilhança. A tabela 2 apresenta a função confiabilidade do sistema de produção. Na figura 2, têm-se um diagrama genérico de uma curva da banheira, os valores de γ e a estratégia de manutenção adequada a cada trecho do ciclo de vida da máquina. Pelo intervalo de confiança de γ, alocam-se às máquinas as estratégias de manutenção. Para o propósito deste artigo, basta dizer que uma estratégia de manutenção corretiva é aquela que não apenas repara a falha, mas corrige o sistema, evitando que a falha se repita, o que é consistente com uma taxa de falhas decrescente, típica da mortalidade infantil. Por seu lado, uma estratégia de manutenção preventiva previne falhas, trocando itens frágeis antes da quebra: com taxa de falhas crescentes, a falha pode ocorrer a qualquer momento e é possível calcular um intervalo que minimize a soma de custos de troca antecipada e quebra inesperada. Finalmente, a preditiva monitora o comportamento de variáveis críticas e tenta predizer o momento em que o comportamento da taxa de risco passa a ser crescente, o que indica intervenção nos itens frágeis do equipamento. Detalhes sobre estratégias de manutenção surgem em Higgins (1998) e Sellitto (2005).

TABELA 1 – Dados e modelo de Weibull para o tempo até a falha das máquinas e do sistema.

	Máquinas					
	RDD-01	RRR-01	RRR-02	LAV-31	RDD-02	SRL-01
dias entre falhas	8	3	9	3	16	30
	7	8	8	4	18	19
	10	8	10	3	17	21
	8	5	4	7	12	17
	10	5	12	3	12	11
	7	2	7	9	12	14
	9	7	6	13	14	14
	9	8	4	3	16	24
	6	5	7	7	25	12
	6	9	4	5	14	17
	4	3	6	3	17	11
	4	4	13	3	13	21
	3	6	2	7	23	13
	3	2	4	8	19	16
	4	3	11	2	14	16
	8	7	4	6	15	25
	4	2	7	6	12	26
	2	4	6	5	15	28
	3	9	5	4	15	24
	6	5	7	5	16	19
	modelo de Weibull a três parâmetros					
t_0	1,28	1,73	0,79	1,42	11,67	10,07
Gamma	1,87	1,27	2,06	1,47	1,06	1,42
Theta	5,3	3,74	6,7	4,26	4,17	9,59
t_{10}	2,88	2,37	3,04	2,34	12,17	12,04
t_{50}	5,65	4,53	6,41	4,74	14,62	17,48
MTBF	5,99	5,2	6,73	5,27	15,74	18,79
	95% do intervalo de confiança para					
Gamma	de 1,21 a 2,48	de 0,82 a 1,68	de 1,33 a 2,73	de 0,95 a 1,94	de 0,69 a 1,41	de 0,92 a 1,88
Theta (dias)	de 4,03 a 6,93	de 2,49 a 5,53	de 5,23 a 8,55	de 2,99 a 5,98	de 2,55 a 6,63	de 6,67 a 13,62
estratégia de manutenção	preventiva	todas	preventiva	preditiva e preventiva	preditiva	preditiva e preventiva

GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas – Ano 2, vol. 3, mai-jun/07, p. 97-108

TABELA 2 – Função confiabilidade R(t) do sistema de produção.

R(t)							
1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias	7 dias	8 dias
1	0,9243	0,6829	0,4198	0,2170	0,0942	0,0349	0,0111

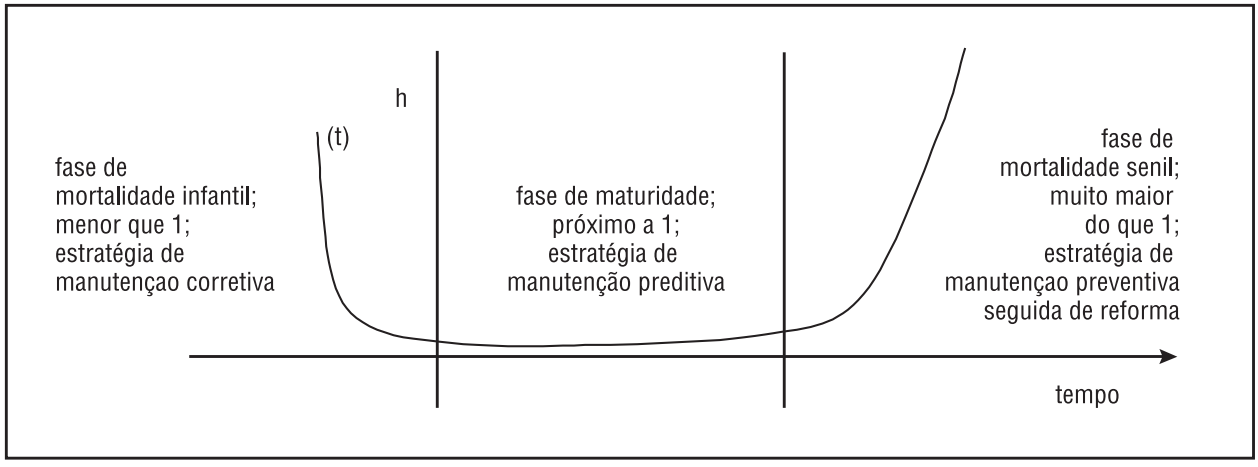

FIGURA 2 – Curva da banheira e estratégias de manutenção.
Fonte: LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005.

A confiabilidade sistêmica da linha é dada pela equação 8, computada numericamente pelo *software* ProSys 98. O ProSys 98 produziu a função R(t) da figura 3, que informa a probabilidade da linha operar até o tempo t, em dias, isenta de falhas de manutenção.

$$R_{total}(t) = \left[\prod_{j=1,4,5,6} R(t)\right].\left[1 - \prod_{j=2,3}\{1 - Rj(t)\}\right] \quad (8)$$

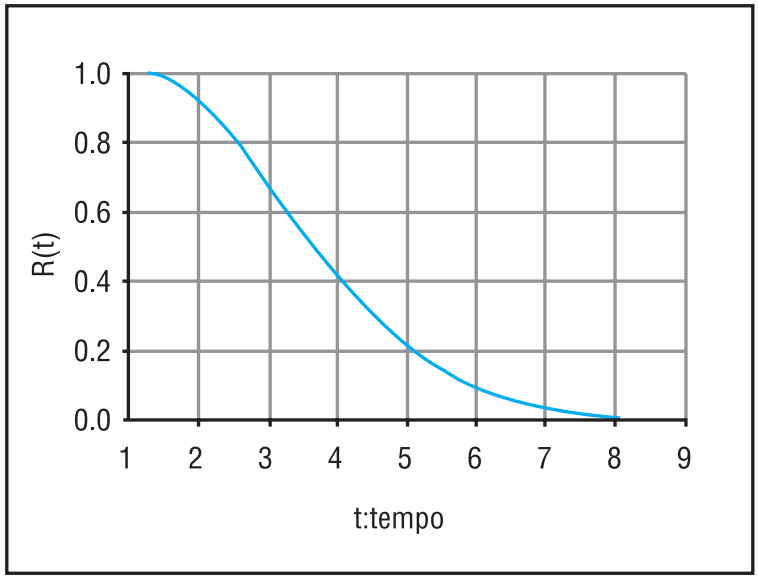

FIGURA 3 – Funções taxa de risco e confiabilidade do sistema produtivo.

Na tabela 3, surgem os intervalos de tempo ótimos entre intervenções nas máquinas em que se recomenda a manutenção preventiva. O cálculo considera a relação entre o custo de uma intervenção preventiva, antecipada ao problema e o custo de ser surpreendido pela quebra, que soma, ao custo da intervenção, o custo da perda de produção. Detalhes do modelo surgem em Monchy (1989) e em Sellitto, Borchardt e Araújo (2002). Para as máquinas com fatores de escala próximos, o intervalo entre intervenções é o mesmo. Já o intervalo de intervenção na máquina SRL-01 é cerca de três vezes maior do que os demais. Um plano de manutenção deve programar uma intervenção na SRL-01, a cada três ou quatro intervenções nas demais máquinas, unificando a parada e oferecendo um ganho de escala no serviço de manutenção, geralmente terceirizado. Tal ganho de escala reduz custo e pode contribuir para a construção de uma vantagem competitiva em custo.

TABELA 3 – Intervalos ótimos de intervenções nas máquinas que receberão manutenção preventiva.

relação entre os custos da emergência e da preventiva	Intervalo entre as intervenções preventivas			
	RDD-01	RRR-02	LAV-31	SRL-01
2,5	inviável	inviável	inviável	inviável
5	4 dias	4 dias	4 dias	16 dias
7,5	3 dias	3 dias	3 dias	14 dias
10	3 dias	3 dias	3 dias	13 dias
15	3 dias	3 dias	3 dias	13 dias

A tabela 4 apresenta os MTBF e MTTR e disponibilidades das máquinas.

TABELA 4 – Cálculo das disponibilidades de máquinas.

máquina	MTBF	MTTR	disponibilidade
RDD-01	5,99 dias	0,95 horas	0,990
RRR-01	5,20 dias	1,05 horas	0,988
RRR-02	6,73 dias	0,75 horas	0,993
LAV-31	5,27 dias	1,70 horas	0,980
RDD-02	15,74 dias	0,98 horas	0,996
SRL-01	18,79 dias	0,76 horas	0,997

Uma análise de alocações de confiabilidade aumentada, é possível. Para uma hipotética meta de confiabilidade total (0,96 em dois dias), o ProSys 98 otimizou a alocação de aumentos de confiabilidade, apresentada na tabela 5. O programa indicou LAV-31 e RDD-01, por serem os elos em série com menores MTBF. RRR-01 e RRR-02, mesmo que tenham MTBF baixo, formam paralelismo. As demais máquinas têm MTBF elevado. Os custos de confiabilidade aumentada foram considerados iguais.

TABELA 5 – Alocação de confiabilidade seguindo mínimo esforço e mínimo custo.

Máquina	Custo de desenvolvimento	Confiabilidade anterior	Confiabilidade alocada	Meta de confiabilidade: ,96 em 2 dias
RDD-01	1	0,974	0,9817	
RRR-01	1	0,9589	0,9589	confiabilidade atual do sistema em 2 dias: 0,9158
RRR-02	1	0,9623	0,9623	
LAV-31	1	0,9432	0,9799	
RDD-02	1	1	1	nova confiabilidade do sistema em 2 dias: 0,9603
SRL-01	1	1	1	

3.2. Discussão

Para discutir o caso, retomam-se a questão e os pressupostos de estudo.

A questão de estudo era: é possível estabelecer estratégias de manutenção baseadas em métodos objetivos? No caso em questão, foi possível chegar a estratégias de manutenção individualizadas, para cada uma das seis máquinas da linha de produção estudada. A estratégia global da linha pode ser dividida em seis estratégias individuais. Às máquinas RDD-01, RDD-02 e RRR-02, foram alocadas estratégias puras. Às demais máquinas, só foi possível alocar estratégias combinadas, pois o número de dados de tempos até a falha, disponíveis para a modelagem, não permitiram, com o nível de confiança adotado de 95%, definir em que trecho da curva da banheira está a previsão mais verossímil para o fator de forma. Os critérios objetivos foram: (i) se o fator de forma cai em uma faixa única, está definida uma estratégia pura para a máquina, tal como em RDD-01, e RRR-02 ; (ii) se o fator de forma estiver centrado em relação a um e os dados aderirem ao modelo exponencial, tal como em RDD-02, opta-se pela preditiva; e (iii) se o fator de forma se estender por mais de uma faixa e não estiver centrado em relação a um, opta-se por estratégias combinadas, como nos demais casos, ressalvando-se que, como em LAV-31 e SRL-01, quando o limite do intervalo está menos do que 0,1 distante de 1, descarta-se a faixa, no caso, a corretiva.

As proposições de estudo eram: (i) métodos objetivos para a formulação de estratégias de manutenção são aplicáveis em ambiente industrial? (ii) que requisitos são necessários para a adoção destes métodos? e (iii) que evidências são necessárias para a comprovação da eficácia destes métodos?

Quanto à primeira proposição, observa-se que, no caso, o método objetivo foi aplicado em ambiente industrial, no qual, muitas vezes, as decisões devem ser rápidas e tomadas com base em informações incompletas e sob incerteza. Apesar destas características decisórias, chegou-se a uma definição estratégica clara. Caso seja adotado, o método permite que um gestor de manutenção não tenha dúvida sobre que estratégias não usar, podendo traçar planos detalhados para cada equipamento e planos globais para o conjunto de equipamentos que compõem a linha. Por exemplo, nas máquinas RDD-01 e RRR-02, o gestor pode descartar as estratégias de manutenção corretiva e preditiva, pois, como as máquinas têm taxas de falhas crescentes, os projetos são suficientes e as quebras por desgastes podem ser retardadas, mas são inevitáveis. Portanto, a estratégia de preventiva, com trocas de peças que não sobreviverão, é adequada e as intervenções em várias máquinas podem ser concentradas, reduzindo a interrupção total da linha.

Quanto à segunda proposição, a principal necessidade diz respeito a um sistema de informações de manutenção, que pode discernir entre interrupções de produção por quebra e interrupções por outros motivos, tais como perda de qualidade, falta de matéria-prima, falta de venda ou falta de operador. Até quanto se pesquisou em estudos de campo, esta dificuldade é real e, muitas vezes, instranponível em manufatura, haja vista que a maioria dos sistemas de informação industriais encontrados, registra apenas interrupções de produção, de qualquer natureza, com pouca discriminação. Dentre os sistemas que classificam as interrupções, alguns o fazem em base pouco precisa, quanto à manutenção, limitando-se a registrar que a interrupção foi solicitada pela equipe de manutenção. Dentre estas, interrupções para instalação de melhorias, trocas de *software*,

inspeções, trocas preventivas ou testes devem ser descartadas, recolhendo-se para a amostra, exclusivamente, aquelas interrupções que resultam de quebras de equipamentos, pois a análise de Weibull deve se limitar a este tipo de erro, para que a conclusão sobre a estratégia de manutenção seja robusta.

Finalmente, quanto à terceira proposição de estudo, entende-se que a principal evidência que pode apontar a eficácia do método, ora proposto, é a medição do resultado obtido, com sua aplicação ao longo do tempo, relativamente aos objetivos da estratégia de manufatura. Como em todo estudo estratégico, o resultado deve ser medido de acordo com o objetivo da estratégia. Neste caso, não é possível isolar os campos de competição, pois há interferências mútuas, mas algumas considerações simplificadas e iniciais são possíveis. Se a estratégia de manufatura exige rapidez e confiabilidade nas entregas, o objetivo da estratégia de manutenção é o aumento da confiabilidade da linha de produção. Se a manufatura exige redução de custo, a manutenção deve aumentar a manutenibilidade, reduzindo custo de serviço. Se a manufatura exige flexibilidade, a manutenção deve oferecer alta disponibilidade, pois haverá mais interrupções para trocas de ferramentas e lotes de produção variáveis serão exigidos. Competição em manufatura baseada em qualidade e em capacidade de inovação, também ocorrem e também podem se valer da manutenção como estratégia de apoio, mas as exigências para este tipo de competição são baseadas em conceitos, tais como, capabilidade e implementação tecnológica que, se bem que possam ser encontrados na gestão estratégica da manutenção, não são de interesse para esta pesquisa e, portanto, não foram investigados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONTINUIDADE DE PESQUISA

Através de um estudo de caso descritivo, apresentou-se e testou-se um método quantitativo e objetivo, para a formulação de estratégia de manutenção de equipamentos complexos de produção, que podem ou não fazer parte de uma linha de produção. A característica destes equipamentos é que eles podem falhar, segundo um número infinito de modos de falha e que estes modos competem entre si: o primeiro modo que falha, causa a falha do equipamento. O objetivo do caso foi heurístico: criou-se uma situação apropriada para teste e robustecimento de uma proposição concebida teoricamente.

A aplicação do método indicou a estratégia de manutenção preventiva para quatro das seis máquinas estudadas, em duas delas de forma pura, em outras duas, de forma combinada com a preditiva. Para estas máquinas, foi possível calcular intervalos ótimos de intervenção, podendo-se criar um ganho de escala no serviço e uma conseqüente redução no custo de manufatura. Em uma máquina, chegou-se a uma estratégia de manutenção preditiva pura e em outra máquina, não foi possível descartar nenhuma das estratégias. Esta foi a única máquina estudada que requereu estratégia de manutenção corretiva, o que pode indicar um ponto frágil na linha de produção, quanto ao projeto da máquina ou quanto à aplicação que lhe foi designada no projeto da linha. Neste caso, é necessário identificar as fragilidades de projeto e corrigi-las, o que pode contribuir para o aumento de confiabilidade. Confiabilidade aumentada pode contribuir para uma vantagem competitiva em manufatura em um cenário de competição por velocidade e confiabilidade de entrega.

Em relação à disponibilidade, os baixos MTBF e MTTR produziram disponibilidades de máquinas e de linha de produção altas. Como este objetivo parece estar atingido, uma alternativa de objetivo global de manutenção, é a redução de custos, sem perda de disponibilidade, o que é consistente com o ganho de escala possível de ser obtido com a concentração dos serviços de manutenção preventiva, geralmente contratados com terceiros.

Casos similares surgem em Sellitto; Borchardt e Araújo (2002); Sellitto (2005) e Martins e Sellitto (2006). Propõe-se, como continuidade, a compilação dos casos existentes, em uma publicação que seja referência bibliográfica para o programa de pós-graduação, que sediou a pesquisa. Também, propõe-se, como continuidade, investigar o papel da manutenção em outros objetivos de manufatura, tais como a qualidade, os serviços associados ao produto e a capacidade de inovação em produtos e serviços oferecidos ao cliente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462:** Confiabilidade e mantenabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

EISENHARDT, K. Building theories from case study research. **The Academy of Management Review**. V.14, nº.4, pp.535–550, 1989..

ELSAYED, E. **System Reliability Engineering**. Readings, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996.

HAHN, G.; SHAPIRO, S. **Statistical models in engineering**. New York: John Wiley and Sons, 1967.

HIGGINS, R. **Maintenance engineering handbook**. New York: Mc Graw Hill, 1998.

LAFRAIA, J. **Manual de confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEWIS, E. **Introduction to reliability engineering**. USA: John Wiley & Sons, 1996.

MARTINS, J.; SELLITTO, M. Análise da estratégia de manutenção de uma concessionária de energia elétrica com base em estudos de confiabilidade. **Anais do XXVIº ENEGEP**, Fortaleza: 2006.

MONCHY, F. **A função manutenção**. São Paulo: Durban, 1989.

MOUBRAY, J. **Introdução à Manutenção Centrada na Confiabilidade**. S. Paulo: Aladon, 1996.

SELLITTO, M., BORCHADT, M.; ARAÚJO, D. Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa. **Anais do XXIIº ENEGEP**, Curitiba: 2002.

SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Produção**. V.15. nº.1, pp.44-59, 2005.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**. V.22, nº2, pp.196-219, 2002.

YIN, R. **Estudo de caso:** planejamento e método. Porto Alegre: Bookman, 2001.

Reconhecimentos

O pesquisador agradece aos executivos da empresa que sediou a pesquisa e à UAPPG da UNISINOS, pelo apoio à pesquisa.