

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

WALDOMIRO ALVES FERREIRA NETO

**MODELO DE POLÍTICA DE INSPEÇÃO DE DUAS FASES VOLTADO PARA
SISTEMAS CRÍTICOS COM INTERVALO VARIÁVEL BASEADO NO CONCEITO
*DELAY-TIME***

Recife

2018

WALDOMIRO ALVES FERREIRA NETO

**MODELO DE POLÍTICA DE INSPEÇÃO DE DUAS FASES VOLTADO PARA
SISTEMAS CRÍTICOS COM INTERVALO VARIÁVEL BASEADO NO CONCEITO
*DELAY-TIME***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcanti.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

F383m

Ferreira Neto, Waldomiro Alves.

Modelo de política de inspeção de duas fases voltado para sistemas críticos com intervalo variável baseado no conceito *delay-time* / Waldomiro Alves Ferreira Neto-2018.

52 folhas, il., tabs., abr. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcanti.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Manutenção. 3. Inspeção. 4. Sistema crítico. 5. *Delay-time*. 6. Cabo de aço. I. Cavalcanti, Cristiano Alexandre Virgínio (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-464



Universidade Federal de Pernambuco Coo
Departamento de Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2

Aos onze dias do mês dezembro do ano de dois mil e dezoito, às 14:00, no Bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **MODELO DE POLÍTICA DE INSPEÇÃO DE DUAS FASES VOLTADO PARA SISTEMAS CRÍTICOS COM INTERVALO VARIÁVEL BASEADO NO CONCEITO DELAY-TIME**, elaborado pelo aluno **Waldomiro Alves Ferreira Neto**, matrícula 079.283.834-38, composta pelo Prof. Cristiano Alexandre Virgíno Cavalcanti (Orientador), Prof. Oscar Olímpio de Araújo Filho (examinador 1) e Prof. Antônio Marques da Costa Soares Junior (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi argüido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela aprovação (aprovação/reprovação) do candidato no Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da UFPE, atribuindo-lhe à monografia a média 9,5 (nove, cinco). Para constar, redigi a presente Ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Prof. Cristiano Alexandre Virgíno Cavalcanti- DEP/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 1: Prof. Oscar Olímpio de Araújo Filho - DEMEC/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 2: Prof. Antônio Marques da Costa Soares Jun., DEMEC/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Recife, 11 de Dezembro de 2018

Sonia Maria A. Barbosa
Coordenadora do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC2
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica - DEMEC/UFPE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado forças durante toda minha vida. À minha família, que em todos os momentos e de todas as formas tem apoiado o meu desenvolvimento profissional e acadêmico. Ao meu orientador, o Prof. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante, por ser meu mentor, me apoiando e incentivando no decorrer do desenvolvimento desse trabalho. E a todas as demais pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para que este sonho se tornasse uma realidade.

RESUMO

No cenário de mercado atual, o gerenciamento adequado da manutenção tem se mostrado cada vez mais importante na busca por competitividade. A manutenção preventiva e a manutenção preditiva têm sido amplamente praticadas, com o objetivo de prevenir a ocorrência de falhas e, conseqüentemente, os seus impactos negativos no processo produtivo. Nesse cenário, este trabalho apresenta um modelo de política de inspeções de duas fases com intervalo variável, voltado para sistemas críticos, onde a ocorrência de falhas pode incorrer em sérios prejuízos em múltiplas dimensões (financeira, humana, entre outras). Assim, foi desenvolvido um modelo de simulação de eventos discretos para um sistema simples, com um componente, cujo processo de deterioração e falha pode ser modelado conforme o conceito *delay-time*. Este modelo possibilita estimar o desempenho de uma política de manutenção em termos do custo esperado por unidade de tempo no longo prazo. O modelo foi aplicado em um estudo de caso sobre um sistema de elevação de carga, no qual o cabo de aço é considerado como componente crítico a ser estudado. Um algoritmo de busca de soluções foi utilizado de modo a obter recomendações para a política de manutenção. Além disso, uma análise de sensibilidade foi realizada, de modo a se observar algumas tendências do modelo. Como resultado, foi verificado que o formato de política proposto, que considera intervalos de tempo entre inspeções variáveis, pode contribuir para prolongar a vida útil do componente, sem incorrer em altos custos devido a inspeções muito frequentes ou devido à ocorrência de falhas. Por fim, destaca-se que o aumento da dificuldade de gerenciamento da política é compensado pela melhora no desempenho, especialmente quando se trata de sistemas críticos.

Palavras-chave: Manutenção. Inspeção. Sistema crítico. *Delay-time*. Cabo de aço.

ABSTRACT

A proper maintenance management has been increasingly important in the quest for competitiveness in the current market scenario. Preventive maintenance and predictive maintenance have been widely practiced in order to prevent the occurrence of failures and, consequently, their negative impacts on the production process. From this perspective, this work presents a two-phase inspection policy model with variable interval, focused on critical systems, in which the occurrence of failures can promote serious damages in multiple dimensions (financial, human, and others). Thus, a simulation model of discrete events was developed for a single component system, whose deterioration and failure process can be modelled according to the delay-time concept. This model is able to estimate the performance of a maintenance policy in terms of the expected cost per unit time over the long term. The model was applied in a case study on a load lifting system, in which the steel cable is considered as a critical component to be studied. A solution search algorithm was used to obtain recommendations for the maintenance policy. In addition, a sensitivity analysis was performed in order to observe some tendencies of the model. As a result, the proposed policy, which considers time intervals between variable inspections, can contribute to prolong component life without incurring high costs due to very frequent inspections or due to the occurrence of failures. Finally, the increase in the difficulty of managing the policy is compensated by the improvement in the performance, especially when it comes to critical systems.

Keywords: Maintenance. Inspection. Critical system. *Delay-time*. Steel cable.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	(a) Detalhe da superfície com arames individuais rompidos e (b) detalhe do cabo de aço após o colapso.....	16
Figura 2 -	Custo x Confiabilidade.....	19
Figura 3 -	Evolução da Manutenção.....	20
Figura 4 -	Curva da banheira.....	24
Figura 5 -	Conceito <i>Delay Time</i>	30
Figura 6 -	<i>Delay-time</i> “h”.....	30
Figura 7 -	Componentes básicos de um cabo de aço.....	35
Figura 8 -	Tipos de composição para cabo de aço (a) simples (b) Seale (c) Filler (d) Warrington (e) Warrington-seale.....	36
Figura 9 -	Tipos de alma em cabo de aço (a) Alma de fibra artificial ou natural (b) Alma de aço formada por cabo independente (c) Alma de aço formada por uma perna.....	36
Figura 10 -	Modos de torção em cabo de aço.....	37
Figura 11 -	Coefficiente de segurança aplicados à cabos de aço.....	37
Figura 12 -	Desgaste volumétrico variando com o ângulo de contato.....	38
Figura 13 -	Representação da Política de Manutenção.....	39
Figura 14 -	Exemplo esquemático do caso 1 ocorrendo na primeira fase.....	41
Figura 15 -	Exemplo esquemático do caso 1 ocorrendo na segunda fase.....	41
Figura 16 -	Exemplo esquemático do caso 2 ocorrendo na primeira fase.....	42
Figura 17 -	Exemplo esquemático do caso 2 ocorrendo na segunda fase.....	42
Figura 18 -	Exemplo esquemático do cenário 3.....	42
Figura 19 -	Fluxograma do algoritmo implementado.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Notação do modelo.....	40
Tabela 2 -	Cálculo dos parâmetros e ações para cada caso.....	43
Tabela 3 -	Resultados das simulações da análise de sensibilidade do modelo.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileiro de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBM	<i>Condition-Based Maintenance</i> (Manutenção Baseada na Condição)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DTM	<i>Delay Time Model</i> (Modelo Delay Time)
FD	Função de Distribuição
FDP	Função Densidade de Probabilidade
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i> (Tempo Médio entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i> (Tempo Médio de Reparo)
NBR	Norma Brasileira
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> (Manutenção Centrada na Confiabilidade)
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> (Manutenção Produtiva Total)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Motivação.....	15
1.3	Objetivos.....	17
1.3.1	Geral.....	17
1.3.2	Específico.....	17
1.4	Estrutura do trabalho.....	17
2	A MANUTENÇÃO.....	19
2.1	Breve Histórico da Manutenção.....	20
2.2	Manutenção Programada.....	21
2.2.1	Manutenção Preventiva.....	21
2.2.2	Manutenção Preditiva.....	21
2.3	Manutenção Não Programada.....	22
2.4	Definições.....	22
2.5	Aspectos Quantitativos.....	23
2.5.1	Falha.....	23
2.5.2	Confiabilidade.....	23
2.5.3	Taxa de Falha.....	24
2.5.4	Disponibilidade.....	25
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1	Abordagens da Manutenção.....	26
3.2	Políticas de Manutenção.....	27
3.3	Política de Inspeção.....	28
3.4	O MODELO <i>DELAY TIME</i> (DTM).....	29
3.4.1	Conceito <i>delay-time</i>.....	29
3.4.2	A Inovação do DTM.....	31
3.4.3	Tipos de DTM.....	31
3.5	Degradação.....	32
3.5.1	Tipos de falhas.....	32
3.5.2	Mecanismo de Degradação.....	33
3.6	Cabo de Aço.....	34
3.6.1	Danos em Cabo de Aço.....	38
4	METODOLOGIA.....	39

4.1	Modelo Proposto.....	39
4.2	Política de Manutenção.....	39
4.3	Notação.....	40
4.4	Pressupostos.....	40
4.5	Desenvolvimento do Modelo.....	41
4.6	Aplicação em um estudo de caso.....	45
4.6.1	Especificação dos parâmetros e outras considerações.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
6	CONCLUSÕES.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Em um cenário globalizado, as empresas vêm buscando aperfeiçoar seus processos, utilizando formas de produção cada vez mais mecanizadas, automatizadas e complexas, necessitando de uma gestão mais enxuta e sofisticada sobre estes sistemas. Deste modo, conforme a mão de obra humana foi sendo substituída por máquinas, esta passou a ser mais exigida, quanto à eficiência e segurança de seus processos, gerando uma necessidade em preservar e garantir que o maquinário em situação extrema, continue funcionando sem atrapalhar o fluxo do processo. Além disso, mudanças em certificações, muitas vezes relacionadas com o aspecto ambiental e social, promoveram uma nova perspectiva relacionada com a competitividade, a qual não é apenas medida em termos de lucratividade, mas também em função do relacionamento com a sociedade e com o meio ambiente.

Assim, a manutenção vem desempenhando um papel fundamental na capacidade de uma empresa em competir com base no custo, na qualidade e no desempenho da entrega de um produto ou serviço, uma vez que apoia e supri as necessidades por confiabilidade, disponibilidade e qualidade dos equipamentos e produtos, bem como reduz custos associados a defeitos e falhas de equipamentos cruciais ao processo produtivo (SWANSON, 1997; PINTELON et al., 2000). Logo, o investimento em um gerenciamento adequado da manutenção tem sido cada vez mais notado no cenário industrial (MENDES, 2005).

De forma geral, a manutenção tem como objetivo assegurar que os componentes do sistema produtivo mantenham a sua capacidade funcional de operação, buscando aumentar a disponibilidade do sistema ao menor custo possível (MOUBRAY, 2000). Segundo Mobley (1990), os custos provenientes da manutenção representam a maior parcela do custo total da operação de uma indústria, variando entre 15% a 60%. A falha dos equipamentos contribui significativamente no custo da manutenção, uma vez que afeta a qualidade dos produtos, a produção, a segurança e o ambiente (MOUBRAY, 1997).

Nessa conjuntura, foram desenvolvidas diversas técnicas, políticas e abordagens de manutenção, estabelecendo regras que garantam o funcionamento da produção continuamente, minimizando as interferências ocasionadas por quebras/falhas ou mau funcionamento de equipamentos. Dentre elas, destacam-se as manutenções preventivas e preditivas, que tem sido amplamente praticada, com o objetivo de prevenir a ocorrência de falhas inesperadas (LAFRAIA, 2001). Em geral, a ocorrência de falhas deve ser evitada

devido aos prejuízos decorrentes de paradas não planejadas do sistema e, em alguns casos, devido a aspectos de segurança da operação.

De acordo com Wang e Banjevic (2012), estima-se que até 80% das atividades de manutenção resultem de defeitos identificados ou relatados anteriormente. Isso decorre do processo de degradação gradual dos dispositivos. Esta degradação se manifesta de diversas formas, desde uma anormalidade na aparência externa dos equipamentos até perdas de desempenho e paradas da produção, fabricação de produtos de má qualidade e poluição ambiental (XENOS, 2004).

O processo de deterioração dos sistemas pode ocorrer de forma gradual, com estados de deterioração, precedentes a falha, possíveis de serem identificados e que tendem a evoluir com o tempo, ou de maneira abrupta, com o sistema interrompendo a operação subitamente, sem apresentar sinais de falha iminente.

Analisando o processo de degradação, o processo de falha pode ser considerado como dois estágios, de “novo” até um ponto em que o defeito se inicia e deste ponto até a falha, conforme o conceito *delay-time* (CHRISTER, 1999; WANG, 2011). Dessa forma, as inspeções são atividades importantes em qualquer programa de manutenção programada, pois quando os itens estão sendo inspecionados, possíveis defeitos podem ser identificados e removidos para evitar futuras falhas (WANG, 2011).

Assim, políticas de inspeção são adequadas para sistemas que apresentam estados de deterioração intermediários possíveis de identificar e/ou para sistemas que apresentam falhas ocultas, ou seja, falhas não pronunciadas que só podem ser verificadas através de inspeções (MUNFORD, 1981; CHRISTER, 1999). Em geral, tais políticas associam uma decisão a ser tomada em função do estado do sistema, verificado na inspeção. Trata-se de uma prática de manutenção preditiva, conforme definido pela norma NBR 5462 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Entretanto, quando a taxa de falha tende a aumentar com o uso e a idade do sistema, a solução óbvia de inspecionar a intervalos constantes torna-se não muito atraente, desejando-se inspeções mais frequentes ou intervalos reduzidos quando a taxa de falhas e/ou defeitos aumenta (MUNFORD, SHAHANI, 1972; LIAO et al, 2010).

Nesse contexto, o atual trabalho apresenta um modelo de uma política de inspeção de duas fases com intervalo variável direcionada para sistemas críticos, nos quais a ocorrência de falhas é percebida de forma imediata e pode ter efeitos bastante negativos. Para fins de modelagem, considera-se um sistema com um único componente, cujo processo de

deterioração pode ser modelado considerando o conceito do *delay-time* (CHRISTER, 1999). Um modelo de simulação foi implementado, de modo a estimar o desempenho de uma política de manutenção e auxiliar na definição de uma boa combinação de valores para as suas variáveis de decisão.

1.1 Justificativa

O aumento dos custos provenientes das atividades de manutenção, que segundo Mobley (1990) podem chegar a 60%, legitimam a importância atual do desenvolvimento de modelos tanto qualitativo como quantitativo das ações de manutenção. De acordo com Gebrael e Lawley (2008), só nos EUA são gastos cerca de 200 bilhões de dólares americanos com manutenção na área industrial. Estima-se que 30% deste valor resulta de ineficiências das ações de manutenção, tais como: paradas não programadas devido a falhas e devido à utilização de políticas de substituição não adequadas.

Logo, adotar uma política ótima de manutenção programada pode, além de trazer melhoras significativas à produtividade da empresa, reduzir significativamente os custos decorrentes desta atividade (SCARF, 1997; PARK, 2000; LOPES et al, 2015).

Visando atingir as normas ambientais e de segurança, cada vez mais importante para conferir competitividade às empresas, uma atenção maior tem sido dada aos sistemas críticos. Todo sistema no qual operações inadequadas ou falhas possam contribuir ou causar condições ambientais ou operacionais inaceitáveis e/ou perigosas, devem ser considerados como críticos. Com o objetivo de garantir o correto funcionamento dos mesmos, atividades de manutenção preditiva e preventiva devem ser realizadas, buscando minimizar os riscos às pessoas e ao meio ambiente.

Entretanto, o processo de modelar uma política ótima apresenta como um de seus desafios balancear os intervalos entre ações e o seu custo-benefício (DEKKER, 1996). Nesse sentido, devido a sua característica de quantificar o tempo no qual um dispositivo permaneceu no estado defeituoso, criando uma relação entre número de falhas e intervalos de inspeção, o conceito *delay-time* é uma poderosa ferramenta de solução (DEKKER, 1996; JIA, CHRISTER, 2003; WANG, 2012). Além disso, sua utilização é viável no meio industrial, pois a maioria dos equipamentos apresenta um processo de falha de dois estágios, devido à natureza gradual do seu desgaste até a falha (WANG, 2012).

Ademais, por causa do aumento da taxa de falha com o tempo, consequentemente dos defeitos, inspeções com intervalos não constante são de importância significativa para a

prática, mas igualmente desafiador na teoria, em virtude de sua complexidade e dificuldade computacional (LIAO et al, 2010; WANG, 2012).

Contudo, com a evolução da informática nos últimos anos, a resolução de problemas gerenciais tornou-se possível através da simulação de situações reais (BAZZO, 2002). A simulação pode ser definida como uma técnica utilizada para estudar, por meio de modelos, o comportamento e reações de um determinado sistema, imitando na totalidade ou em parte suas propriedades em uma escala reduzida, permitindo assim sua manipulação e estudo detalhado (BAZZO, 2002). Assim, a simulação pode contribuir significativamente para tomadas de decisão nas empresas, inclusive na manutenção industrial.

Segundo Mello (2007), o uso da simulação é sugerido em dois casos. Quando a resolução do problema é inviável através de experimentos ou quando o problema é muito complexo para tratamento analítico.

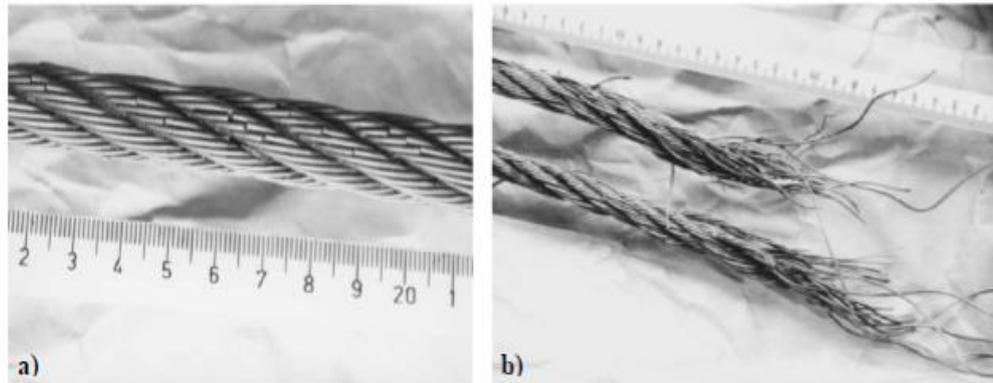
Portanto, o objetivo deste trabalho é propor um modelo de uma política de inspeção de duas fases com intervalos variáveis baseada no conceito *delay-time*. O algoritmo desenvolvido permite simular as chegadas de defeitos e falhas no componente crítico, além de estimar o desempenho das políticas de inspeção, auxiliando na tomada de decisão.

1.2 Motivação

O desenvolvimento deste trabalho foi motivado por um estudo de caso sobre inspeção e manutenção de cabos de aço utilizados em pontes rolantes. De acordo com Cruzado et al. (2012), cabos de aço que operam sobre polias (compondo o principal sistema de tração adotado no meio industrial para elevação de cargas) tendem a se desgastarem naturalmente, devido ao movimento oscilatório produzido em seus arames.

Buscando entender as razões para o curto tempo de vida deste item, Tokar e Arzensek (2002) realizaram análises de falha em cabos de aços utilizados em guindastes. Em sua avaliação, os autores concluíram que os danos ocasionados nos arames e as, conseqüente, falhas do cabo estavam associados ao dano por fadiga e ao baixo nível de inspeção do cabo de aço. A fadiga promove o colapso do cabo de aço através do crescente número de arames rompidos, provocando a redução de sua capacidade de carga. A Figura 1 demonstra o cabo de aço estudado por Tokar e Arzensek (2002). Na figura é possível ver o nível de desgastes sofrido pelo material que entrou em colapso após 12 meses de operação.

Figura 1– (a) Detalhe da superfície com arames individuais rompidos e (b) detalhe do cabo de aço após o colapso.



Fonte: Tokar e Arzensek (2002).

De acordo com Singh et al. (2016), o desgaste mecânico, a fadiga, o cisalhamento e a corrosão são os principais fatores para a ocorrência da falha em cabos de aço. Assim, como é comum em componentes mecânicos, a condição física (ou “estado”) de um cabo de aço tende a se deteriorar ao longo do tempo.

Por isso, antes da ocorrência da falha, o cabo apresenta um estado de defeito, ou seja, mesmo que possa desempenhar a sua função, apresenta sinais de não conformidade, como arames partidos, deformações ou redução de diâmetro (NBR 4309/1998). O estado do cabo de aço pode ser verificado através de inspeções. Portanto, o processo de deterioração do cabo de aço pode ser modelado considerando o conceito *delay-time* (CHRISTER, 1999).

Em muitos casos, a falha de um cabo pode representar risco de vida para trabalhadores, além de prejuízos significativos para a empresa, por isso, os cabos de aço podem ser considerados como componentes críticos em um sistema.

Atualmente, existem diversas entidades normatizadoras (ASTM, DIN, ANSI, ABNT) que têm como função desenvolver e publicar normas técnicas com o objetivo de orientar e padronizar o uso de materiais, sistemas e métodos, dentre outros. No Brasil, a norma NBR 4309/1998 da ABNT regulamenta os métodos de inspeção e define os aspectos que caracterizam o estado defeituoso para cabos de aço, exigindo o seu descarte em tal situação. Além disso, a norma estabelece que inspeções devam ser realizadas no mínimo uma vez ao mês, devendo a sua frequência aumentar à medida que se aproxima o fim da vida útil do cabo.

As empresas podem utilizar a frequência apresentada na norma NBR 4309/1998 ou desenvolver uma específica para seu segmento, dependendo do grau de risco de cada serviço executado, inspeções anteriores e vida útil anterior do cabo de aço utilizado. Porém, o inspetor

poderá reduzir o intervalo de tempo entre as inspeções, dependendo das condições e durabilidade dos cabos de aço analisados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

É objetivo do presente estudo propor um modelo de política de inspeção de duas fases com intervalos variáveis baseada no conceito *delay-time* destinada a sistemas críticos, onde a ocorrência de falhas pode incorrer em sérios prejuízos em múltiplas dimensões (financeira, humana, entre outras).

1.3.2 Específicos

- Desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos para um sistema simples, com um componente, cujo processo de deterioração e falha é modelado conforme o conceito *delay-time*. O modelo deve ser capaz de programar os períodos de inspeção, estimando o desempenho de uma política de manutenção em termos do custo por unidade de tempo esperado no longo prazo;
- Aplicar o modelo a um estudo de caso sobre um sistema de elevação de carga, no qual o cabo de aço é considerado como componente crítico a ser estudado;
- Utilizar um algoritmo de busca de soluções, de modo a obter recomendações para a política de manutenção;
- Elaborar uma análise de sensibilidade, de modo a se observar algumas tendências do modelo.

1.4 Estrutura do trabalho

Além do primeiro capítulo do trabalho que apresentou uma visão geral sobre o que será desenvolvido, o Capítulo 2 faz uma breve retrospectiva sobre a evolução da manutenção ao longo dos tempos, aproveitando para conceituar alguns termos normativos que serão abordados constantemente ao decorrer do trabalho. Do mesmo modo, exhibe uma breve revisão teórica de alguns aspectos quantitativos que são de entendimento necessário para compreender o modelo proposto neste trabalho, como, por exemplo, aspectos referentes à taxa de falhas e à teoria da confiabilidade.

O Capítulo 3 trata de uma fundamentação teórica e realiza uma revisão bibliográfica dos três assuntos discutidos neste trabalho: as Políticas de Inspeção, degradação e o Modelo *Delay Time* (DTM). Foi feita uma revisão de maneira sucinta sobre as políticas de inspeção e degradação, apresentando alguns tipos de aplicação e fazendo algumas discussões. A maior ênfase do capítulo é a conceituação, suposições e aplicações do DTM.

Já no Capítulo 4 é discutido e apresentado o modelo proposto por este trabalho, explorando suas suposições e aspectos quantitativos. O modelo de política de inspeção apresentada adota a estrutura do Modelo *Delay Time* para, estatisticamente, estimar o estado defeituoso do componente. O modelo recomenda uma programação ótima de realizações de inspeções em duas fases: a primeira possuindo intervalos periódicos de inspeção e a segunda com intervalos de inspeções que vão se reduzindo proporcionalmente. Para encontrar uma boa combinação de valores para as variáveis de decisão, o modelo conta com um algoritmo de busca de soluções. Para um maior entendimento, um exemplo numérico foi realizado através de um estudo caso direcionado para cabos de aço utilizados em pontes rolantes.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta os resultados encontrados com o estudo de caso e é feita uma análise de sensibilidade do modelo, buscando compreender as suas tendências. As conclusões e observações referentes ao modelo proposto foram feitas no Capítulo 6 e, em seguida, apresenta-se todas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

2 A MANUTENÇÃO

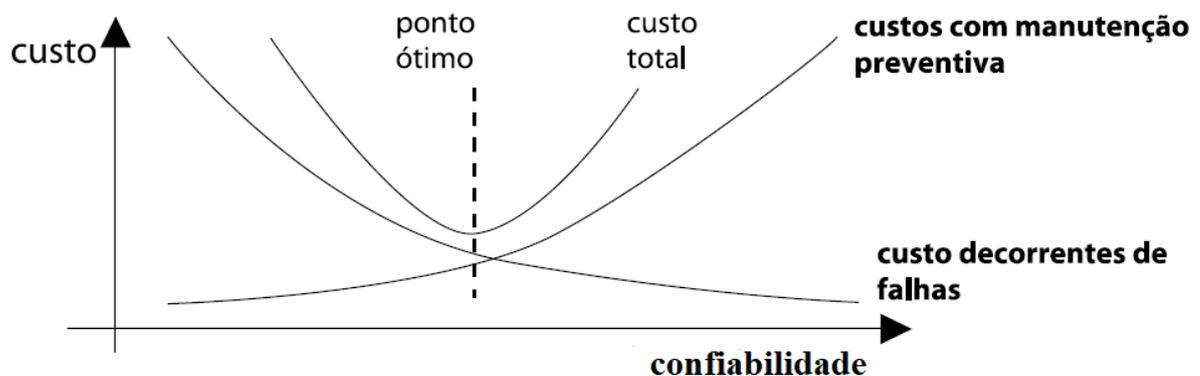
Desde a revolução industrial, apesar de seu progresso, a manutenção dos equipamentos tem sido um desafio, devido a fatores como complexidade, custo e competição (DHILLON, 2002).

Visualizada por muitos ainda hoje como sendo uma atividade marginal, o surgimento e desenvolvimento da engenharia de manutenção é uma das principais causas da ascensão da importância das atividades de manutenção dentro das empresas (SCARF, 1997). Motivada por modificações no cenário social, econômico e tecnológico ocorrida após a 2ª guerra mundial, os estudos das políticas de manutenção se aprimoraram, oferecendo resultados econômicos positivos, passando a ser vista como um fator de redução de custos e aumento de confiabilidade e qualidade dos seus produtos.

Como discutido no Capítulo 1, a manutenção está intrinsecamente relacionada aos custos operacionais. Assim, obter a melhor política de manutenção, que através do aperfeiçoamento de determinados atributos do sistema produtivo, tais como, disponibilidade, confiabilidade e/ou qualidade, minimizem os custos finais envolvido no processo, é o objetivo de praticamente todos os modelos de decisão encontrados hoje na literatura.

Uma ilustração da relação entre o custo e a confiabilidade, considerando os investimentos em manutenção preventiva e os custos decorrentes das falhas dos equipamentos, encontra-se no gráfico ilustrado pela Figura 2. Através de sua análise, pode-se perceber claramente o balanço feito no momento de avaliação do custo benefício que um investimento em manutenção ocasionará na produção.

Figura 2– Custo x Confiabilidade.



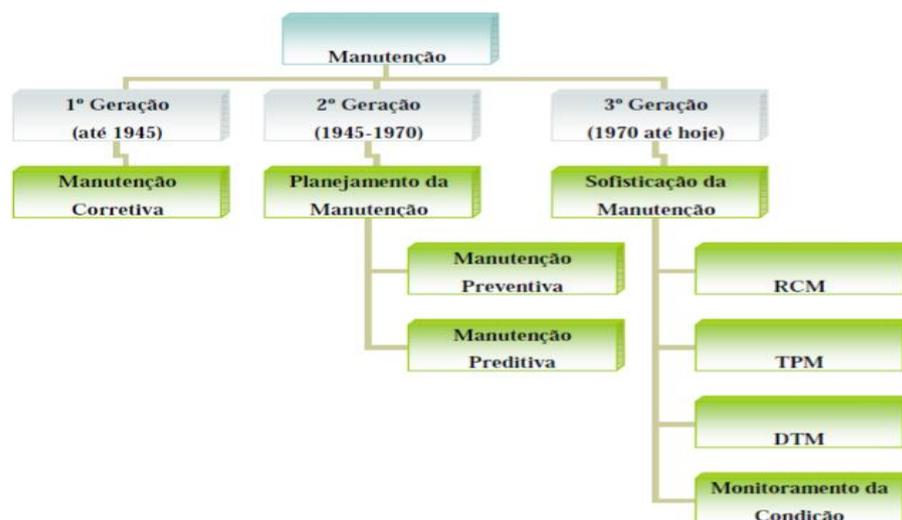
Fonte: Mirshawa e Olmedo (1993).

2.1 Breve Histórico da Manutenção

Moubray (1997) e Siqueira (2005) classificam o desenvolvimento da manutenção através de três gerações distintas:

- **A Primeira Geração:** É marcada por realizações de manutenções essencialmente corretivas. Durou até o final da segunda guerra mundial e representa o antigo paradigma da manutenção, quando esta atividade era vista como uma despesa dentro da indústria. Dessa forma, atividades de manutenção só eram executadas após a ocorrência de uma falha (PINJALA et al., 2006);
- **A Segunda Geração:** Marcada pelo avanço da industrialização, foi quando surgiram as políticas de manutenção preventiva e preditiva. Segundo Moubray (1997), é nesta fase que as empresas começam a necessitar de uma maior disponibilidade e confiabilidades das plantas industriais, buscando o aumento da vida útil do equipamento a baixos custos associados;
- **A Terceira Geração:** Ainda segundo Moubray (1997), esta fase é datada por uma sofisticação da manutenção, através do surgimento de novas técnicas de predição e novas abordagens, tais como o RCM e o TPM. É também nessa fase que a manutenção começa a ser exigida do posto de vista da sustentabilidade e certificações. Isto é, a manutenção começa a ganhar relevância no âmbito industrial, fornecendo vantagem competitiva, tornando-se uma função estratégica dentro da empresa.

Figura 3- Evolução da Manutenção.



Fonte: Moubray (1997).

2.2 Manutenção Programada

Com a evolução da manutenção, que inicialmente se limitava a práticas corretivas, ou seja, reparos após a ocorrência de falhas, exigências por maiores planejamentos da manutenção, acarretaram no desenvolvimento de novas políticas e técnicas para esta atividade. Assim, surgiram novas abordagens, hoje conhecidas como políticas de manutenção programada, como, por exemplo, as políticas de manutenção preventiva e preditiva, que, aos poucos, foram substituindo a abordagem da manutenção corretiva, anteriormente mais amplamente empregada.

Manutenção programada pode ser definida como qualquer ação de manutenção que anteceda a degradação da qualidade dos produtos e equipamentos (CAVALCANTE; ALMEIDA, 2007). Logo, sua aplicação tem o objetivo de elevar a vida útil dos componentes, conferindo benefícios de longo prazo. Dessa forma, à medida que os sistemas vão se tornando mais complexos, essa abordagem tende a ser mais apropriada, uma vez que reduz significativamente as interrupções da linha produtiva, eventos altamente custosos.

2.2.1 Manutenção Preventiva

Pertencente ao grupo de políticas de manutenção programada, a manutenção preventiva é uma abordagem que procura monitorar o tempo de vida dos equipamentos, tomando a decisão sobre quando é o melhor momento de realizar suas ações baseado nesse parâmetro. São considerados apenas aspectos inerentes à confiabilidade dos equipamentos, ou seja, MTBF, MTTR, FDP, etc., desprezando qualquer aspecto externo que possa eventualmente influenciar na redução da vida útil do componente.

2.2.2 Manutenção Preditiva

Também chamada de Manutenção Baseada na Condição (CBM), a manutenção preditiva apresenta a proposta de monitorar o estado do equipamento, tomando a decisão de quando realizar suas ações baseadas não mais no tempo, mas sim no estado do equipamento. Algumas práticas como o monitoramento contínuo dos equipamentos e/ou realizações de inspeções, são realizadas para controlar, medir e avaliar alguns parâmetros do sistema, observando assim o seu estado.

2.3 Manutenção Não Programada

Apesar da crença popular de que adotar uma política de manutenção programada é suficiente para resguardar o bom funcionamento das máquinas, esta afirmativa não se confirma (NAKAJIMA, 1989). Segundo Kardec e Nascif (2001), políticas de manutenção programada não garante a conquista da quebra zero/ falha zero, ou seja, mesmo com sua aplicação, sempre haverá ações de manutenção corretiva, devida a ocorrência de falhas inesperadas. Assim, manutenção não programada ou manutenção corretiva é a atuação para a correção da falha depois que ela ocorre (XENOS, 2004).

2.4 Definições

Após definir e diferenciar a manutenção preventiva da manutenção preditiva, alguns outros conceitos diretamente relacionados à manutenção se fazem necessários para um melhor entendimento deste trabalho. As definições aqui apresentadas foram retiradas da norma brasileira NBR 5462/1994 da ABNT, que apresenta definições sobre os termos utilizados em manutenção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

- **Confiabilidade** $R(t_1, t_2)$: É a probabilidade de um item desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado intervalo de tempo (t_1, t_2).
- **Disponibilidade**: Capacidade de um item estar em condição de executar certa função em um dado instante, ou durante um intervalo de tempo determinado, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.
- **Defeito**: Qualquer desvio das características de um item em relação aos seus requisitos.
- **Falha**: É o termino da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Ou seja, é a impossibilidade de uma peça, componente ou máquina de desempenhar a sua função, apresentando um período de indisponibilidade, quando deverá ser reparado ou substituído.

2.5 Aspectos Quantitativos

2.5.1 Falha

O evento falha, ao qual estão sujeitos todos os equipamentos e sistemas, é uma das maiores preocupações da engenharia da manutenção. Assim, procura-se encontrar diferentes formas de gerenciar os recursos objetivando evitar ao máximo a ocorrência desse evento.

Na ótica da estatística, a falha é considerada sendo uma variável de natureza aleatória, dependendo de diversos fatores para acontecer. Deste modo, buscando prever quando este evento ocorrerá, a variável aleatória “tempo até a falha” é utilizada na estimativa, a partir da FDP e da FD, respectivamente, fornecidas por $f(t)$ e $F(T)$, as probabilidades de que este evento ocorra.

De acordo com Meyer (1983), sendo T a variável aleatória para representar o tempo até a falha, a probabilidade que um item venha a falhar até um dado tempo t , pode ser calculada por:

$$P(T \leq t) = F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt, \quad (1)$$

Onde,

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (2)$$

No modelo proposto neste trabalho, à falha ainda terá um carácter aleatório, se comportando exatamente como descrito acima. Porém, será dividida em duas fases, conforme o DTM, com cada fase contendo nas suas FDP e FD a sua representação quantitativa.

2.5.2 Confiabilidade

A confiabilidade começou a ser aprofundada principalmente com o surgimento do *RCM (Reliability Centered Maintenance)*, motivado por exigências nas certificações das aeronaves BOEING (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2005). Esse conceito probabilístico recebe atualmente um papel importante na elevação da qualidade dos produtos e na maximização da capacidade produtiva, uma vez que aumenta a disponibilidade dos equipamentos.

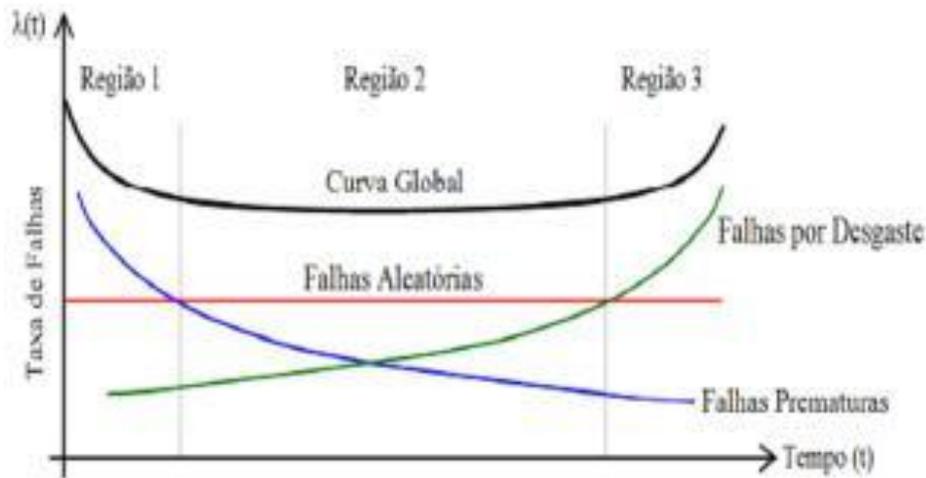
Assim, esse atributo é essencial para a operação de qualquer sistema moderno, pois sua análise relaciona-se à incerteza das falhas e suas eventuais consequências (ZIO, 2009). Essa probabilidade pode ser calculada através da seguinte equação:

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(s)ds = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

2.5.3 Taxa de Falha

É a medida da frequência de ocorrência das falhas no decorrer do tempo de um componente. O modelo amplamente aceito para representar a taxa de falha de componentes mecânicos é a curva da banheira, ilustrada na Figura 4.

Figura 4– Curva da banheira.



Fonte: Freitas e Colosimo (1997).

Analisando a curva da banheira, percebe-se que a vida de um equipamento é descrita em três fases, com diferentes comportamentos da taxa de falha em cada uma delas, representado na figura através de regiões. A região 1 representa a primeira fase, conhecida por fase da mortalidade infantil. É a etapa introdutória, onde os equipamentos ainda se encontram em fase de aperfeiçoamento ou testes, o que justifica a taxa de falha ser decrescente no tempo, tendendo a se estabilizar. Essa região exemplifica o comportamento de produtos novos, em processo de desenvolvimento ou em caráter experimental. As ações de manutenção executadas nessa fase estão associadas a ajudar no desenvolvimento do projeto.

A região 2 ilustra a segunda fase do componente, a maturidade. Nessa fase os projetos já foram bem desenvolvidos, apresentando uma taxa de falhas constante, assim, a ocorrência do evento falha é completamente aleatória. Também conhecida como fase de vida útil do componente, as ações de manutenção agora já são programada, utilizando monitoramento e inspeções para verificar a condição dos itens, ações preventivas restritas a revisões periódicas e ações corretivas quando necessário.

Por sua vez, a região 3 demonstra o que ocorre na terceira fase do equipamento. É nesta fase que os problemas devido a um processo de degradação se apresentam com maior frequência e se intensificam. Nessa fase é interessante adotar uma política de manutenção mais alinhada com a característica crescente da taxa de falhas. O DTM mostra-se adequado a esta fase, visto que a frequência de ocorrência de falhas aumenta.

Após compreender as fases que um item pode se encontrar, a taxa de falhas pode ser modelada matematicamente por diferentes funções de densidade de probabilidade, dependendo da fase em que o item se apresenta, sendo as mais comuns às distribuições Weibull e Exponencial. A equação abaixo descreve a relação existente entre a taxa de falhas, a FDP das falhas e a confiabilidade.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

2.5.4 Disponibilidade

A disponibilidade está quantitativamente interligada a confiabilidade, uma vez que um aumento da disponibilidade deve estar associado a uma melhora significativa da confiabilidade.

A avaliação da disponibilidade é regularmente o alvo de diversas modelagens, mesmo que de forma indireta, visto que a maioria dos modelos busca minimizar o *Downtime*, isto é, o tempo no qual o equipamento fica fora de operação, conseqüentemente, maximizando a disponibilidade. Ela pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (5)$$

Assim, a disponibilidade é a razão entre o tempo que o componente permaneceu operando, ou seja, seu tempo de vida útil, e o tempo de duração de um ciclo de operação, que contabiliza o tempo em que o componente ficou operando mais o tempo de duração da atividade de manutenção e/ou interrupções (tempo total).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Abordagens da Manutenção

A manutenção pode ser visualizada através de duas grandes abordagens, as quais são fundamentadas para a resolução de questionamentos essenciais que compõem a engenharia de manutenção, sendo elas:

- Quando fazer; e
- Como fazer.

A estruturação dessas abordagens da manutenção é apresentada através de duas vertentes: a matemática e a de engenharia (ALMEIDA; SOUSA, 2001).

A primeira abordagem consiste em estudos relacionados à otimização quantitativa dos procedimentos de manutenção (ALMEIDA; SOUSA, 2001). Trata-se dos modelos matemáticos aplicados à manutenção com o intuito de otimizar alguns parâmetros, tais como custo e disponibilidade, buscando responder à pergunta de quando fazer uma ação de manutenção de modo a otimizar algum fator de decisão.

Já a segunda abordagem está preocupada com o tratamento que será aplicado no ato da execução da manutenção, isto é, preocupa-se com a definição das ações a serem realizadas, respondendo a pergunta de “como fazer”. Refere-se às ações de manutenções que serão adotadas em uma política de manutenção, seja na correção do defeito ou da falha quando identificados, ou durante a realização de uma manutenção programada.

Nesta conjuntura, os modelos de manutenção são classificados de acordo com três critérios:

- 1) Modos de falha no sistema;
- 2) Observação do estado do sistema;
- 3) Número de componentes.

Em relação aos modos de falha no sistema, os modelos podem ser divididos em dois tipos: os de dois estados e os de multi-estados, dependendo da quantidade de modos que as falhas incidam no sistema.

Sobre a observação do sistema, os modelos podem ser de manutenção preventiva, quando o estado do sistema é dito como conhecido; e, modelos de manutenção preditivas, quando o atual estado do sistema não é conhecido, necessitando assim executar ações para

descobrir seu estado. Este caso tem sido amplamente explorado nas modelagens da manutenção nos últimos tempos, especialmente em modelos de inspeção.

Por fim, dois tipos de modelos surgem quando se considera o número de componentes, podendo ser, segundo Almeida e Sousa (2001), modelos simples, modelo os quais consideram o sistema formado apenas por um componente, e os modelos complexos, nos quais o sistema é considerado possuindo um conjunto de componentes independentes.

3.2 Políticas de Manutenção

Visando solucionar o primeiro questionamento para a manutenção descrito anteriormente, o de determinar o momento ótimo para execução de uma atividade de manutenção, a abordagem matemática da manutenção apresenta basicamente as duas estruturas:

- 1) Manutenção corretiva;
- 2) Manutenção programada.

A política de manutenção corretiva condiciona a execução de uma intervenção no dispositivo à ocorrência de uma falha. Essa política de manutenção é geralmente utilizada quando os custos operacionais associados à prática de manutenção programada, seja preventiva ou preditiva, são superiores à troca ou reparo do dispositivo após a ocorrência da falha.

Já a política de manutenção programada, é indicada para os dispositivos cujo custo envolvido em se corrigir sua falha superam os custos contabilizados com execuções de inspeções e reparos, ou substituições feitas de forma preventivas. Como detalhado no capítulo anterior, essa política de manutenção se subdivide em duas: Política de manutenção preventiva, onde o tempo de vida do componente é a variável de decisão, considerando seu estado como sempre conhecido; e a política de manutenção preditiva, na qual o estado verificado durante a realização da inspeção é a variável de decisão para realização da manutenção.

Para descobrir o estado em que se encontram os componentes de um sistema e, assim, poder avalia-los, é necessário a definição dos intervalos de tempo para que a verificação seja feita. Portanto, os modelos desenvolvidos para definir esses intervalos, são chamados de políticas de inspeção.

Lembrando que, mesmo adotando uma política de manutenção programada, o sistema ou componente ainda poderá vir a falhar e, conseqüentemente, ações de manutenção não programadas (corretivas) serão necessárias. A política ótima de manutenção programada tem o objetivo de minimizar esses eventos.

Resumindo, para cada sistema existe um método mais adequado, eficiente e econômico, não existindo uma política de manutenção que seja a melhor (XENOS, 2004). Nessa conjuntura, Cavalcante et al. (2011) diz que se o equipamento ou sistema não apresenta sinais de defeitos que indicam que a falha vai acontecer, a indisponibilidade é inevitável, a menos que o componente seja preventivamente substituído, sugerindo-se políticas de manutenção preventiva. No entanto, o mesmo autor diz que se o componente apresentar um estado defeituoso que indique que a falha está próxima de ocorrer, então alta disponibilidade pode ser alcançada com uma política de inspeção; isto porque se a inspeção ocorrer enquanto o componente está no estado defeituoso, então o componente é substituído e não há indisponibilidade não planejada. Portanto, nesse caso, política de inspeção pura pode ser rentável no que diz respeito à inspeção e substituição.

Como os estados operacionais do componente estudado neste trabalho são modelados de acordo com conceito *delay-time*, descrito com mais detalhes adiante, a política de manutenção escolhida foi à política de inspeção.

3.3 Política de Inspeção

Como dito anteriormente, políticas de inspeção associam uma decisão a ser tomada em função do estado do sistema, verificado na inspeção, tratando-se de uma prática de manutenção preditiva, sendo adequada para sistemas que apresentam estados de deterioração intermediários possíveis de identificar e/ou para sistemas que apresentam falhas ocultas, ou seja, falhas não pronunciadas que só podem ser verificadas através de inspeções (MUNFORD, 1981; CHRISTER, 1999).

As bases das políticas de inspeção, como se conhece atualmente, começaram a ser desenvolvidas na década de sessenta, com trabalhos desenvolvidos por Barlow et al (1963) e Barlow e Proschan (1965), que já naquela época definiam métodos ótimos para a realização destes procedimentos de manutenção.

Na década de setenta, surgem os primeiros trabalhos abordando as políticas de inspeções, indispensáveis para a manutenção preditiva. Foi neste contexto que Munford e Shahani (1972) desenvolveram uma política ótima de inspeção para identificar falhas em

sistemas. A política proposta por estes autores define um parâmetro “p” que será utilizado como critério de decisão para determinar a periodicidade de execução da inspeção. A estimativa deste parâmetro é feita através de dados de manutenção. Essa política, como característica deste parâmetro “p”, apresenta intervalos decrescentes entre inspeções consecutivas quando o sistema possui uma taxa de falhas que cresce com o tempo, e, intervalos crescentes quando a taxa de falhas decresce. Uma aplicação desse modelo é realizada em outro estudo realizado pelos mesmos autores, Munford e Shahani (1973), no qual o tempo para a falha é estimado através de uma distribuição Weibull.

No mesmo contexto, investigando por que as inspeções são importantes, Christer (1976) propôs o conceito *delay-time* para justificar a necessidade de inspeções em plantas industriais, tornando-se um conceito chave que fornece a base para a construção de políticas de inspeção (WANG, 2012; LOPES et al, 2015). Desde então, o conceito vem sendo abordado em diversos estudos (CHRISTER; WALLER, 1984; WANG; BAKER, 1993; WANG, 2011; WANG, 2012). Por mérito de seu impacto na manutenção de plantas industriais, tanto na teoria quanto na prática, políticas de inspeções baseadas no conceito *delay-time* tendem a aparecer cada vez mais na literatura (WANG, 2012).

Ainda que muitas políticas baseadas no *delay-time* considerem apenas um intervalo de inspeção, na prática inspeções em diferentes intervalos e níveis são comuns (WANG, 2008; WANG, 2012). Alguns estudos nessa área foram realizados por Cavalcante et al (2011) e Wang et al (2012). Contudo, mesmo diante de sua importância prática, em consequência de sua dificuldade computacional, há poucos estudos considerando esse tema na literatura.

3.4 O MODELO *DELAY TIME* (DTM)

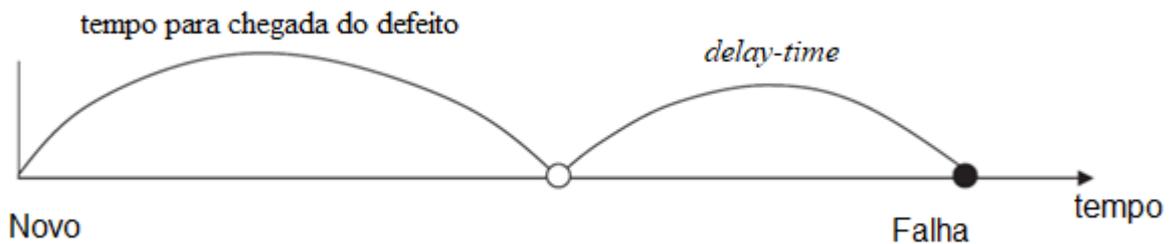
3.4.1 Conceito *delay-time*

O conceito *delay-time* refere-se ao processo de falha de um componente como um processo de dois estágios, desde novo até um ponto inicial em que um defeito pode ser identificado por uma inspeção e, deste ponto, até a falha, se o defeito não foi observado. Deste modo, o componente é considerado como tendo três possíveis estados:

- Estado (0) ou estado operacional normal, comumente chamado de bom;
- Estado (1) ou estado defeituoso;
- Estado (2) ou estado falho.

A duração do tempo desde o ponto de início do defeito até a falha é chamada de *delay-time*. O modelo Delay Time supõe que os tempos nos estados bom e defeituoso são variáveis aleatórias e independentes. A Figura 5 ilustra o tempo para chegada do defeito, representado pelo círculo branco, e o *delay-time* até a falha, representada pelo círculo preto. Nota-se que no estado defeituoso, o componente continua operando, tendo sua operação interrompida somente no estado falho, onde se torna não operacional.

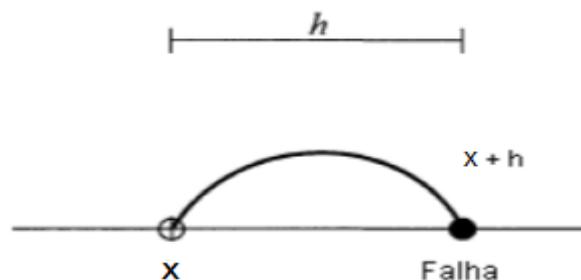
Figura 5 – Conceito *Delay Time*.



Fonte: Wang e Banjevic (2012).

Se uma inspeção é realizada durante o *delay-time*, o defeito pode ser removido dependendo da qualidade da inspeção e da facilidade de remoção do defeito. Na literatura, é comum utilizar a consoante “ x ” para representar o tempo da chegada do defeito, a consoante “ h ” para representar o *delay-time*, sendo o tempo até a falha à soma dos dois tempos, “ $x+h$ ”, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6– *Delay-time* “ h ”.



Fonte: Adaptada de Christer (1999).

Como são consideradas variáveis aleatórias e independentes, a modelagem do *delay-time* (h) e da chegada do defeito (x) é feita através das funções de densidade de probabilidade e das distribuições acumuladas que mais se aproximam com suas características.

De acordo com Christer (1999), o DTM deve ser escolhido não só por seu caráter generalista, visto que também pode tratar sistemas com dois estágios, ou seja, que passam do estado (0) diretamente para o estado (2), considerando $h=0$, como tratar sistemas que

apresentam o estado defeituoso (1); mas também, devido sua crescente e vasta aplicação em modelagem de manutenção, mostrando resultados satisfatórios ao longo dos anos.

3.4.2 A Inovação do DTM

O Modelo *Delay Time* diferencia-se dos demais modelos por considerar o aparecimento de algum tipo de defeito precedente a falha e possível de se identificar, já que a grande maioria dos modelos existentes para a modelagem da manutenção considera a falha como sendo abrupta, ou seja, passando direto do estado (0) para o estado (2). Porém, conforme dito por Christer e Jia (2003), a verdadeira inovação deste modelo está na tentativa de quantificar o período no qual o componente fica no estado defeituoso, e, dessa forma, adota-lo na modelagem da manutenção, visto que, ainda segundo estes autores, a ocorrência de um defeito precedente a falha é observada há bastante tempo pelos engenheiros. Logo, o *delay-time* é considerado como uma janela de oportunidade de evitar que a falha venha a acontecer.

Outra inovação está no evento de interesse, o defeito. Enquanto os demais modelos propõem definir uma periodicidade para a manutenção buscando identificar componentes que já falharam, o DTM muda o alvo para o evento “Defeito”. Assim, através das inspeções, o DTM visa encontrar um defeito e corrigi-lo imediatamente, reduzindo ou evitando que as tão indesejadas falhas ocorram. Esta característica representa um ganho significativo quando comparado aos outros modelos de inspeção, devido aos elevados custos que a ocorrência das falhas representam para os sistemas.

3.4.3 Tipos de DTM

Desde que foi originalmente proposto por Christer e Waller (1984), devido a sua aplicação a distintos problemas de manutenção, o DTM sofreu algumas modificações ao longo do tempo, podendo ser separado em categorias.

Segundo Wang e Banjevic (2012), o DTM pode ser dividido em duas categorias, um modelo de sistema complexo e um modelo de rastreamento de componente, onde o primeiro se refere a um sistema com muitos componentes e modos de falhas e o segundo refere-se a um único componente sujeito a um único modo de falha. Christer (1999) detalha esses dois tipos básicos derivados do modelo original da seguinte maneira:

- 1) A primeira categoria é referente à manutenção em plantas industriais complexas, onde a modelagem considera um sistema formado por múltiplos

componentes como sendo uma planta industrial operando em regime permanente, como proposto no modelo original;

- 2) A segunda categoria é uma proposta de modelagem em um único dispositivo reparável, sendo restrito a um único modo de falha.

3.5 Degradação

O estado de defeito presente no DTM é essencialmente elaborado para quantificar algum mecanismo deteriorante. A identificação do defeito, alvo da teoria do DTM, fundamenta-se, assim, em uma tentativa de barrar a evolução de uma degradação, que poderia ocasionar uma falha do componente, ou seja, interrompendo o cumprimento de sua função requerida.

3.5.1 Tipos de Falhas

Um modo de falha pode ser descrito, segundo Cooke (1996), como a maneira na qual o componente venha a falhar, geralmente sobre a ótica funcional ou sub-funcional. Nesse contexto, Gersbakh e Kordonskiy (1969) categorizaram os modos de falhas de um equipamento ou sistema em quatro tipos distintos. Segundo os mesmo autores, as razões mais rotineiras para ocorrência da falha são:

- 1) Defeitos de construção: neste grupo as falhas acontecem devido à evolução de algum defeito ou de alguma imperfeição inserida durante a construção ou desenvolvimento do equipamento. Os autores exemplificam este tipo de falha com um exemplo de um equipamento projetado sem levar em consideração à variação de carga às quais estão sujeitos;
- 2) Defeitos Tecnológicos: falhas originadas como consequência de alguma violação tecnológica durante o processo de produção de algum equipamento ou sistema;
- 3) Defeitos devido à má utilização: estas falhas estão relacionadas com a violação das restrições de uso, as quais o equipamento ou sistema está submetido;
- 4) Idade: aqui as falhas ocorrem devido a um processo de deterioração o qual todo componente mecânico está sujeito durante o decorrer de sua vida operacional.

De acordo com a classificação proposta por Gersbakh e Kordonskiy (1969), nota-se que o processo de degradação é representado pela falha por idade, sendo este o modo de falha

mais evidente, estando diretamente relacionado a algum tipo de dano gradual. O motivo pelo qual este é o mecanismo mais evidente é que não importa quão perfeito seja a tecnologia empregada na sua construção, o equipamento irá, de alguma maneira, com o decorrer do tempo, sofrer mudanças irreversíveis causadas pelos mecanismos de degradação e, se não for remediado, acarretará na sua falha (GERSBAKH; KORDONSKIY, 1969). Portanto, conforme dito por Hosseini et al. (1999), a falha pode ser representada através de uma deterioração gradual dos parâmetros do equipamento ou sistema, que, sem a devida manutenção, acarretará em uma falha.

De uma forma mais ampla e geral, Gersbakh e Kordonskiy (1969) classificam em duas maneiras como as falhas podem ocorrer, sendo elas:

- 1) De forma instantânea;
- 2) De forma gradual.

A primeira forma de falha faz referência a um tipo de falha aleatória que evolui através da ocorrência de pulos, ou seja, mudanças significativas do estado do componente que ocorrem de forma abrupta. Os autores sugerem utilizar uma distribuição exponencial para quantificar esse fenômeno, uma vez que sua ocorrência é totalmente aleatória.

Já as falhas graduais consistem num processo de degradação usual, onde durante a realização de uma inspeção é possível identificar esse processo de deterioração. Para esse tipo de fenômeno, as distribuições mais indicadas são as Gamma, Weibul e a Normal.

3.5.2 Mecanismos de Degradação

Um mecanismo de falha pode ser interpretado sendo o processo físico que conduz um componente ao estado falho (COOKE, 1996). Nessa visão, entende-se como um mecanismo de degradação os diferentes processos físicos ou químicos, pelo qual a degradação do desempenho do equipamento se apresenta. Logo, segundo Nelson (1990), é de fundamental importância entender os diferentes mecanismos de degradação, visto que cada um pode ser modelado matematicamente de forma diferente.

Ainda segundo este autor, os mecanismos de degradação se caracterizam da seguinte forma:

- Fadiga: é o mecanismo de maior reponsabilidade pelas falhas em componentes mecânicos. Os materiais que sofrem este tipo de falhas estão submetidos a variações repetidas de aplicação de cargas mecânicas, incluindo vibrações;

- Deformações: fundamenta-se em uma modificação lenta e gradual da estrutura do material, principalmente quando sujeito a uma carga mecânica constante, interferindo nas funções do equipamento ou causando rupturas ou fraturas. Este tipo de degradação pode ser acelerado através do incremento na temperatura, nas cargas mecânicas e exposição a produtos químicos;
- Trincas: materiais como vidro, plástico, metais e cerâmicas podem apresentar esse tipo de mecanismo, sendo de origens diversas as razões pela qual estas matérias possam vir a trincar;
- Degastes: este mecanismo de degradação é predominante em componentes que sofrem fricção com remoção de material durante sua utilização. Altas velocidades ou rotações, falta de lubrificação e temperaturas elevadas são algumas variáveis que podem acelerar este processo;
- Corrosão/oxidação: é a deterioração a partir da reação com o oxigênio do ar, entre outros compostos químicos, como flúor, cloro, enxofre, etc. Quanto maior a concentração das substâncias químicas envolvidas, mais acelerado é o processo. Catalizadores e altas temperaturas também aceleram este mecanismo;
- Erosão: caracterizam-se pela ação de agentes externos sobre o componente que, usualmente, estão expostos as intempéries do tempo (clima), como ventos, sol e chuva. Também envolve, geralmente, corrosão e oxidação.

Nelson (1990) ainda acrescenta a vibração a estes mecanismos de degradação. Também reconhecida por Cooke (1996), a vibração é um dos mecanismos de falhas mais evidentes, atuando em componentes e sistemas submetidos a rotações, como motores e geradores, ou componentes sensíveis ao movimento, como, por exemplo, equipamentos de alta performance (alta sensibilidade).

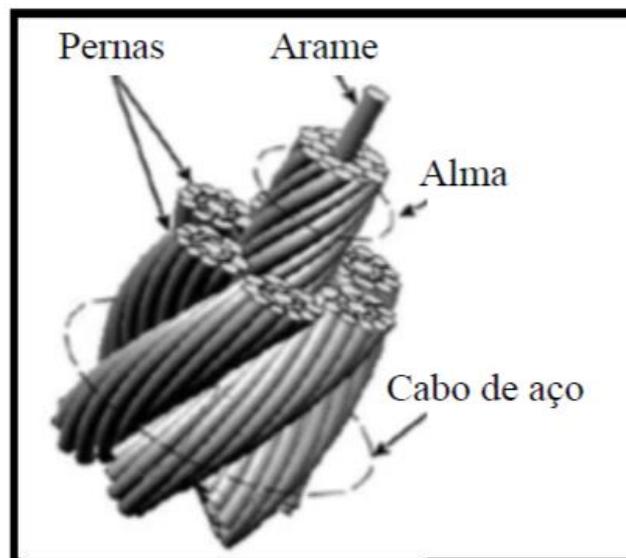
3.6 Cabo de Aço

O cabo de aço são elementos bastante utilizados na indústria, estando presente em aplicações estruturais e de transporte de passageiros ou carga. Dessa forma, influenciado pela necessidade de entender quais fatores influenciam e limitam seu tempo de vida, um dos alvos dos pesquisadores tem sido entender o desgaste dos cabos de aço (HOBBS; RAOOF, 1994; ZHANG et al., 2003; WANG et al., 2012).

Há uma variedade enorme de tipos de cabos de aço, com variações estruturais para melhor adequarem-se às condições de operação de cada aplicação, sendo assim um componente de uso geral ou específico. Os cabos de aço podem ser classificados de acordo com seu diâmetro, tipo construtivo, material de composição, tipo de alma, torção, acabamento e/ou categoria de resistência.

São compostos, basicamente, por arames e pernas, podendo possuir ou não alma, a depender de sua aplicação. Detalhes da estrutura de um cabo de aço que possui alma são exibidos na Figura 7. A forma como o cabo é construído é muito importante, pois esta influencia sua resistência, podendo interferir no seu tempo de vida.

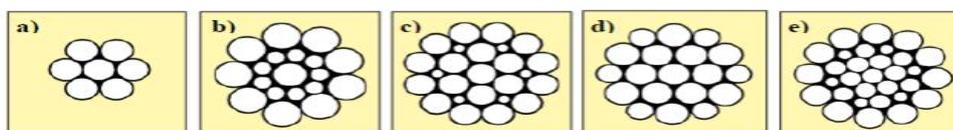
Figura 7- Componentes básicos de um cabo de aço.



Fonte: Adaptado de Cruzado et al. (2010).

Pode-se definir, segundo a NBR 6327 (2006), como composição do cabo de aço “a forma como os arames estão dispostos nas pernas”. Assim, a construção do cabo de aço pode ser definida analisando a sua seção transversal, podendo ser: simples, *Seale*, *Filler*, *Warrington* e *Warrington-Seale*. A Figura 8 mostra estes tipos construtivos, podendo perceber suas diferenças.

Figura 8- Tipos de composição para cabo de aço (a) simples (b) Seale (c) Filler (d) Warrington (e) Warrington-seale.

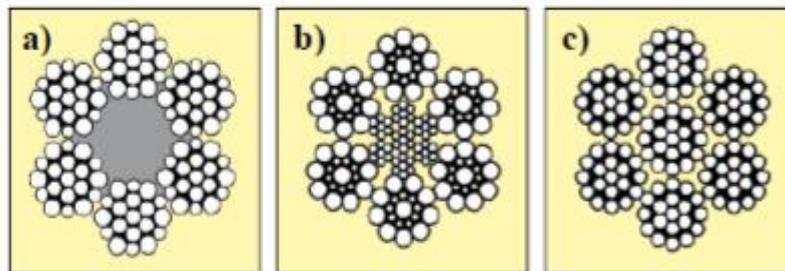


Fonte: CIMAF (2009).

Percebe-se através da Figura 8, que na composição simples, os arames possuem aproximadamente o mesmo diâmetro e na composição *Seale* existem, no mínimo, duas camadas adjacentes com a mesma quantidade de arames, onde em cada camada os arames possuem o mesmo diâmetro; Na composição *Filler* são adicionados arames menores entre os arames principais, visando uma maior acomodação dos arames principais, sem haver modificações nas propriedades mecânicas do cabo; O modelo *Warrington*, por sua vez, possui, no mínimo, uma camada com arames de diâmetro diferentes dispostos de forma alternada; Por fim, a composição *Warrington-Seale* é uma combinação dos dois modelos, buscando combinar as características de ambos (NBR 6327, 2006; CIMAF, 2009).

Em relação à alma, o cabo de aço pode ter alma de fibra natural (AF) ou de fibra artificial (AFA), pode ser um cabo de aço independente (AACI) ou constituído por uma perna (AA), conforme mostra a Figura 9.

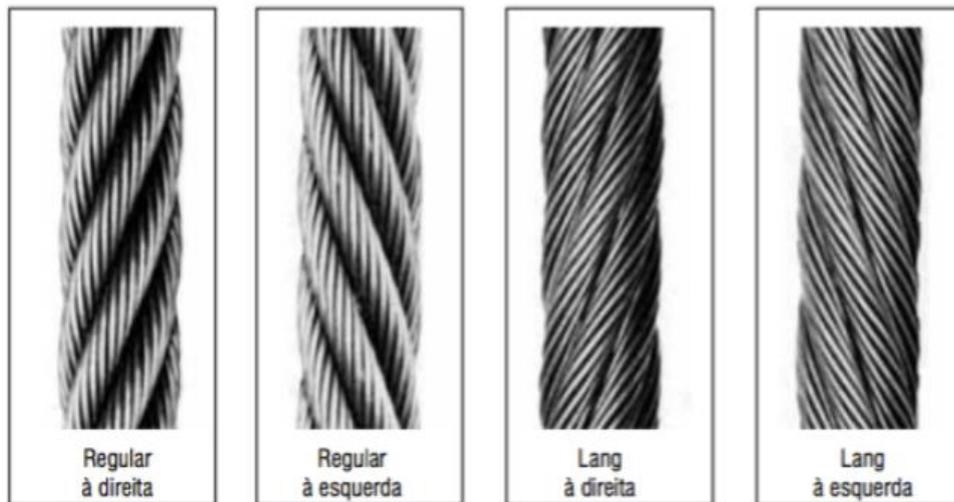
Figura 9- Tipos de alma em cabo de aço (a) Alma de fibra artificial ou natural (b) Alma de aço formada por cabo independente (c) Alma de aço formada por uma perna.



Fonte: CIMAF (2009).

Como as pernas estão dispostas em forma de hélice ao redor da alma ou núcleo, o modo de torção é fundamental. Assim, o sentido da torção pode ser à direita (Z) ou à esquerda (S), e a torção, Regular ou Lang, conforme mostrado na Figura 10. Nota-se que as características de torção se combinam, formando quatro modelos possíveis.

Figura 10- Modos de torção em cabo de aço.



Fonte: CIMAF (2009).

De forma simples, a torção tipo Regular é aquela em que a os arames da camada externa têm o sentido da torção contrário ao sentido de torção das pernas do cabo. No tipo Lang o oposto é verificado.

Como geralmente estão envolvidos em equipamentos de elevação e transporte de carga, ou seja, atividades de risco, os cabos de aço são utilizados com um alto coeficiente de segurança, visando garantir uma maior segurança na operação e evitar riscos aos operadores. A Figura 11 mostra uma tabela com os coeficientes de segurança utilizados em algumas aplicações que envolvem cabos de aço.

Figura 11- Coeficiente de segurança aplicados à cabos de aço.

Aplicações	Fatores de Segurança
Cabos e cordoalhas estáticas	3 a 4
Cabo para tração no sentido horizontal	4 a 5
Guinchos, guindastes, escavadeiras	5
Pontes rolantes	6 a 8
Talhas elétricas	7
Guindaste estacionário	6 a 8
Laços	5 a 6
Elevadores de obra	8 a 10
Elevadores de passageiros	12

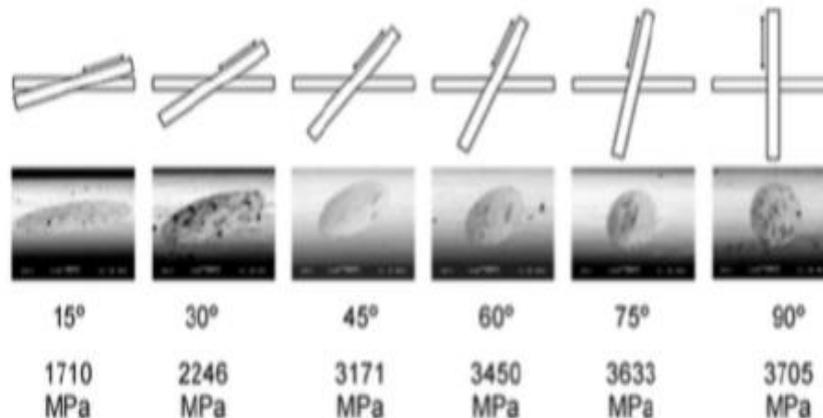
Fonte: CIMAF (2009).

3.6.1 Danos em Cabo de Aço

Como dito anteriormente, os principais fatores que conduzem o cabo de aço à falha são: o desgaste, a fadiga, a corrosão, mau uso, aquecimento e a rotação (SINGH, 2016). De acordo com os estudos realizados por Tokar e Arzensek (2000), os principais danos ocasionados nos arames eram devido à fadiga e ao baixo nível de inspeção do cabo de aço, visto que a fadiga acarreta em rompimento de arames, que, assim como todos outros mecanismos de degradação citados, podem ser facilmente detectados em uma inspeção.

Estudando os parâmetros que aceleram a degradação do cabo de aço, Cruzado et al. (2011) percebeu que o desgaste volumétrico, um dos critérios que caracterizam o estado defeituoso do cabo de aço segundo a NBR 4309 (1998), para um carregamento normal fixo, varia de acordo com o ângulo de contato entre os arames de aço, já que a pressão é inversamente proporcional à área de contato. A Figura 12 mostra o experimento feito pelo autor, mantendo sob carregamento constante de 1N.

Figura 12- Desgaste volumétrico variando com o ângulo de contato.



Fonte: Cruzado (2011).

Como se pode notar, o cabo de aço possui um processo de falha gradual, apresentando um estado defeituoso possível de ser identificado através de uma inspeção, podendo ser facilmente modelado de acordo com o conceito *delay-time*. Desta forma, a escolha por uma política de inspeção e por adotar um modelo de três estados (bom, defeituoso e falho) é plausível.

4 METODOLOGIA

4.1 Modelo Proposto

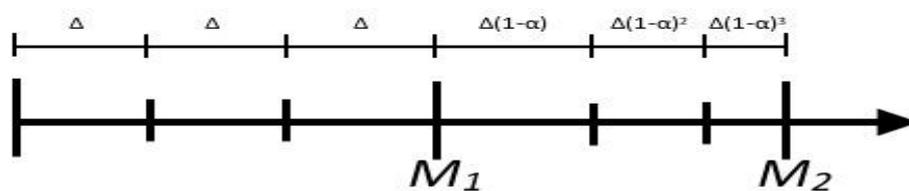
Para apoiar o processo de definição da política de manutenção em contextos como o observado no estudo de caso, foi desenvolvido um modelo *delay-time* para um sistema simples, composto por um componente e um suporte, que juntos desempenham uma função operacional (ASCHER; FEINGOLD, 1984).

Considera-se que a funcionalidade do sistema depende do estado do componente: se o componente estiver em estado bom ou defeituoso, o sistema encontra-se operacional (ou seja, capaz de realizar as suas funções), e se o componente estiver falho, o sistema encontra-se falho. Com a substituição do componente, o sistema como um todo é renovado.

4.2 Política de Manutenção

Considerando os aspectos observados no estudo de caso, propõe-se uma política de inspeção de duas fases, caracterizada da seguinte forma: na primeira fase, orienta-se a realização de M_1 inspeções com intervalos de tempo fixos e iguais a Δ entre duas inspeções consecutivas. Passada a primeira fase sem ter ocorrido a substituição do componente, orienta-se a realização de mais M_2 inspeções (segunda fase). Entretanto, na segunda fase os intervalos de tempo entre inspeções são reduzidos gradativamente de acordo com fator α , conforme ilustrado na Figura 13. A substituição do componente é realizada quando uma inspeção indica estado de defeito, quando ocorre uma falha, ou preventivamente na (M_1+M_2) -ésima inspeção (independentemente do estado do componente), o que ocorrer primeiro.

Figura 13 – Representação da Política de Manutenção.



Fonte: Esta pesquisa (2018).

O aumento da frequência das inspeções na segunda fase busca compensar o aumento da taxa de chegada de defeito do componente, que tende a aumentar com o tempo. A política resultante é complexa, mas em casos onde a falha do sistema tende a ser crítica (como no caso

de cabos de aço), a melhoria do desempenho da manutenção compensa o aumento da dificuldade gerencial.

4.3 Notação

A notação utilizada ao longo deste trabalho é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Notação do modelo.

Variáveis de decisão	
M_1	número de inspeções na primeira fase
M_2	número de inspeções na segunda fase
Δ	intervalo de tempo entre inspeções na primeira fase
A	fator de ajuste do intervalo entre inspeções na segunda fase
Critério de decisão	
C_T	custo por unidade de tempo (taxa de custo)
Parâmetros do modelo	
X	tempo até a chegada do defeito – variável aleatória não negativa
H	<i>delay-time</i> – variável aleatória não negativa
F_x	função distribuição de probabilidade acumulada de X
F_h	função distribuição de probabilidade acumulada de H
I	índice que indica o número da inspeção
I_i	tempo até a i -ésima inspeção
E_c	custo da manutenção no ciclo de renovação do componente
E_v	comprimento do ciclo de renovação do componente
T_{PP}	tempo da substituição preventiva programada, (M_1+M_2) -ésima inspeção
C_i, C_p, C_f	respectivamente, custos de inspeção, substituição preventiva e substituição corretiva

Fonte: Esta pesquisa (2018)

4.4 Pressupostos

O desenvolvimento do modelo foi realizado a partir dos seguintes pressupostos:

- As distribuições F_x e F_h são conhecidas e estatisticamente independentes;
- As inspeções são perfeitas, ou seja, consegue identificar todos os defeitos existentes, sem a ocorrência de erros de qualquer natureza;

- c) O tempo necessário para execução das ações de inspeção e manutenção é desprezível;
- d) As falhas se auto anunciam, sendo percebidas imediatamente;
- e) A manutenção corretiva é realizada imediatamente após a ocorrência da falha;
- f) Se uma inspeção identificar algum defeito, a substituição é feita imediatamente;
- g) Considera-se que sempre existem sobressalentes disponíveis.

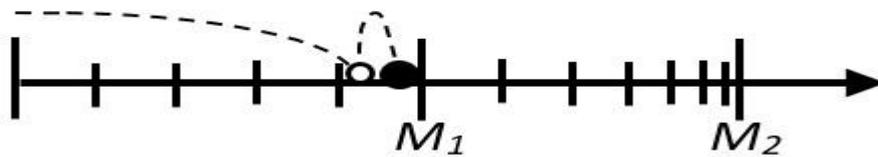
4.5 Desenvolvimento do Modelo

Foi desenvolvido um modelo de simulação de eventos discretos para avaliar o desempenho da política de manutenção em função das variáveis de decisão. Os parâmetros de entrada do modelo são definidos de acordo com o contexto investigado.

Nas condições apresentadas, três cenários possíveis referentes ao desenvolvimento do ciclo de renovação podem ser verificados, conforme detalhamento a seguir. Como padrão de representação, é adotada uma circunferência para representar a chegada do defeito, e um círculo preto para representar a ocorrência da falha.

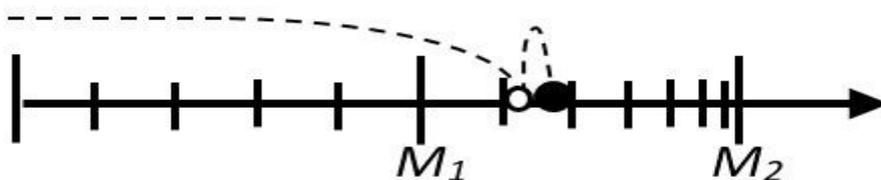
- a) Cenário 1: ocorre a chegada do defeito no período de inspeções, podendo ser tanto na primeira quanto na segunda fase, e o *delay-time* é inferior ao tempo até a inspeção subsequente. Nesse caso o defeito não é detectado e a falha ocorre, conforme ilustrado na Figura 14 e na Figura 15;

Figura 14– Exemplo esquemático do caso 1 ocorrendo na primeira fase.



Fonte: Esta pesquisa (2018).

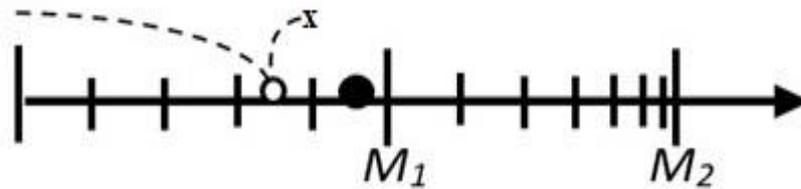
Figura 15– Exemplo esquemático do caso 1 ocorrendo na segunda fase.



Fonte: Esta pesquisa (2018).

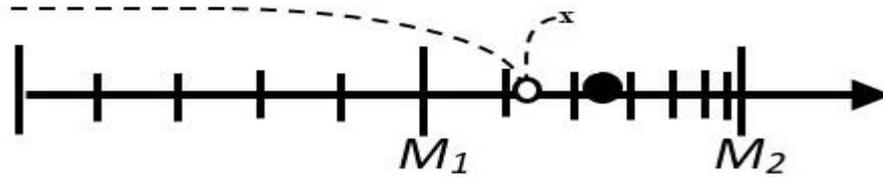
b) Cenário 2: ocorre a chegada do defeito no período de inspeções, podendo ser tanto na primeira quanto na segunda fase, e o defeito é identificado na inspeção subsequente, de forma que a substituição preventiva é realizada, conforme ilustrado na Figura 16 e na Figura 17;

Figura 16- Exemplo esquemático do caso 2 ocorrendo na primeira fase.



Fonte: Esta pesquisa (2018).

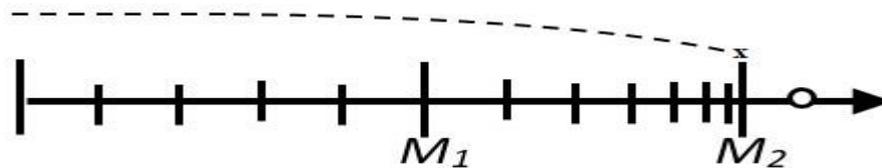
Figura 17- Exemplo esquemático do caso 2 ocorrendo na segunda fase.



Fonte: Esta pesquisa (2018).

c) Cenário 3: o componente é substituído preventiva em T_{PP} , antes da chegada do defeito, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18- Exemplo esquemático do cenário 3.



Fonte: Esta pesquisa (2018).

A contagem temporal é feita a cada ciclo de renovação do componente, com o início da contagem coincidindo com o início da vida do componente. Dessa forma, I_i é o tempo, a partir do início da vida do componente, até uma inspeção de número i . Denominando i a última inspeção anterior à chegada do defeito, os valores de E_C , E_V e as ações realizadas em cada cenário estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2– Cálculo dos parâmetros e ações para cada caso.

Cenário	E_C	E_V	Ação
1	$(i+1).C_i + C_p$	I_{i+1}	Substituição preventiva
2	$i.C_i + C_f$	$X+H$	Substituição corretiva
3	$(M_1+M_2).C_i + C_p$	T_{PP}	Substituição preventiva

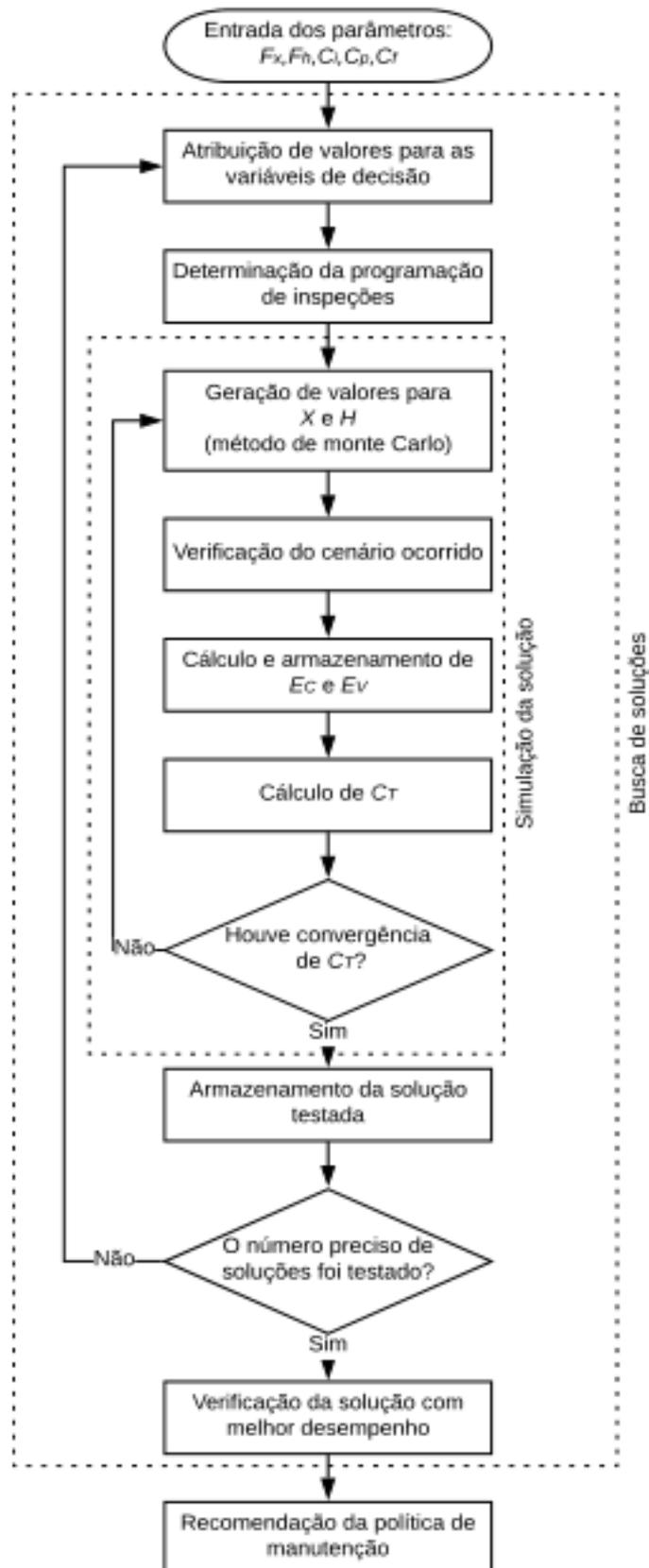
Fonte: Esta pesquisa (2018).

O algoritmo de simulação utilizado para estimar o desempenho da política de manutenção foi implementado conforme a seguinte lógica:

- Passo 1: os parâmetros de entrada são definidos;
- Passo 2: são atribuídos valores para as variáveis de decisão;
- Passo 3: com base nas variáveis de decisão, determina-se a política de inspeção;
- Passo 4: utilizando o método de Monte Carlo, são gerados valores para X e H a partir das distribuições F_x e F_h ;
- Passo 5: verifica-se qual cenário ocorre. Os valores de E_C e E_V são calculados e armazenados;
- Passo 6: o valor de C_T é calculado como E_C/E_V ;
- Passo 7: os passos 4-7 são repetidos até que se verifique convergência do valor de C_T ;
- Passo 8: o desempenho da política de manutenção é apresentado (C_T).

O algoritmo de simulação foi embutido em um algoritmo de busca de soluções, desenvolvido com o objetivo de ajudar na definição de uma política de manutenção que apresente um bom desempenho, conforme apresentado na Figura 19. Todo o procedimento foi implementado no *software* Python.

Figura 19– Fluxograma do algoritmo implementado.



Fonte: Esta pesquisa (2018).

4.6 Aplicação em um estudo de caso

Foi realizado um estudo de caso sobre inspeção e manutenção do cabo de aço de uma ponte rolante utilizada para transporte de cargas. Para definição de uma política de manutenção adequada, foi feita uma aplicação do modelo apresentado.

4.6.1 Especificação dos parâmetros e outras considerações

O processo de deterioração e falha do cabo de aço é modelado considerando o conceito *delay-time*. As condições que caracterizam o estado de defeito são indicadas pela norma NBR 4309/1998. Para a distribuição de probabilidade do tempo até a chegada do defeito, foi considerada uma distribuição Weibull com parâmetros $\eta_1=360$ dias e $\beta_1=3$ (respectivamente, parâmetros escala e de forma), para a distribuição de probabilidade do *delay-time*, também foi considerada uma distribuição Weibull com parâmetros $\eta_2=30$ dias e $\beta_2=1$.

Com relação aos custos da manutenção, o custo da execução de uma inspeção foi considerado como unidade de referência, de forma que $C_i=1$ un. (não especificando em unidades monetárias). Como as atividades de inspeção e manutenção preventiva podem ser programadas para os horários de produção reduzida, os custos para a sua execução não são tão significativos se comparados ao custo de uma substituição corretiva. Para o custo da substituição corretiva, além de se considerar o custo da ação de manutenção em si, devem ser considerados os custos decorrentes da parada na produção (lucro cessante) e também os custos decorrentes da ocorrência de uma falha, que pode ter sérios efeitos. Dessa forma, os demais custos foram estimados da seguinte forma: $C_p=20$ un. e $C_f=300$ un.

Para o contexto deste estudo de caso, algumas considerações adicionais foram feitas a respeito da política de manutenção: conforme recomendado pela norma NBR 4309/1998, o intervalo de tempo entre inspeções deve ser no máximo 30 dias. Dessa forma, foi considerado esse valor como referência para a primeira fase da política de manutenção, de forma que Δ é pré-definido como 30 dias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O algoritmo foi utilizado de modo a obter a política de manutenção recomendada para o estudo de caso apresentado (caso base). Uma análise de sensibilidade foi realizada, de forma a observar o comportamento dos resultados obtidos para caso em que há variação em alguns dos parâmetros de entrada do modelo. Os resultados são apresentados na Tabela 3: na linha 1 é apresentado o resultado para o caso base; nas demais linhas são apresentados os resultados para os demais casos e os parâmetros com valores diferentes são destacados em cinza.

Tabela 3- Resultados das simulações da análise de sensibilidade do modelo.

Caso	Parâmetros de entrada					Política recomendada				C_T (un./ dia)	
	η_1 (dias)	η_2 (dias)	Δ (dias)	C_i (un.)	C_p (un.)	C_r (un.)	M_1	M_2	α		T_{PP} (dias)
1	360	30	30	1	20	300	3	8	0,15	214	0,199
2	360	30	30	1	20	600	2	8	0,20	159	0,235
3	360	30	30	1	20	900	0	7	0,10	141	0,260
4	360	30	30	1	20	150	6	5	0,25	248	0,167
5	360	30	30	1	20	100	6	7	0,15	296	0,149
6	360	30	30	1	20	75	9	2	0,20	313	0,137
7	360	30	30	1	100	300	4	18	0,10	350	0,479
8	360	30	30	1	150	300	3	19	0,05	444	0,612
9	360	30	30	1	10	300	4	1	0,25	142	0,140
10	360	30	30	1	5	300	2	2	0,05	115	0,099
11	360	30	30	5	20	300	6	0	-	180	0,337
12	360	30	30	10	20	300	6	0	-	180	0,505
13	360	30	15	1	20	300	9	10	0,05	249	0,212
14	360	30	45	1	20	300	0	12	0,15	218	0,195
15	360	20	30	1	20	300	4	3	0,30	166	0,215
16	360	10	30	1	20	300	2	6	0,20	148	0,240
17	360	45	30	1	20	300	3	7	0,10	231	0,183
18	360	60	30	1	20	300	5	6	0,15	256	0,170
19	220	30	30	1	20	300	2	5	0,30	118	0,291
20	180	30	30	1	20	300	1	7	0,25	107	0,340

Fonte: Esta pesquisa (2018).

Considerando os parâmetros de entrada apresentados no tópico anterior, obtém-se a seguinte recomendação para a política de manutenção: $\Delta=30$ dias, $M_1=3$, $M_2=8$ e $\alpha=0,15$, o que resulta em $C_T=0,199$ un. por dia. Devido ao alto custo associado à substituição corretiva, recomenda-se uma política de manutenção relativamente conservadora, com um maior número de inspeções na segunda fase, com fator de ajuste superior a 10%, e o tempo para a substituição preventiva programada (T_{PP}) é inferior a η_1 ($T_{PP}=0,6 \cdot \eta_1$).

A partir da análise de sensibilidade, observa-se que, com o aumento de C_f , a política de manutenção recomendada tende a orientar para a substituição preventiva mais cedo, com inspeções concentradas na segunda fase e com um fator de ajuste significativo (linha 2-3). No sentido contrário, quanto menor o valor de C_f , recomenda-se a realização de inspeções com menor frequência e a substituição preventiva é programada para mais tarde, obtendo um melhor aproveitamento da vida útil do componente (linhas 4-6).

O aumento de C_p tem um impacto significativo no desempenho da política de manutenção, e a tendência é que se recomende a realização de mais inspeções e a substituição preventiva seja programada para mais tarde, de forma a se obter um melhor aproveitamento da vida útil do componente (linhas 7-8). No sentido contrário, para valores baixos de C_p , recomenda-se a substituição preventiva para mais cedo, de forma que seja possível prevenir mais ainda a ocorrência de falhas sem um custo significativo associado (linhas 9-10). Já com o aumento de C_i , observa-se que não é recomendada a execução da segunda fase da política de manutenção, e o impacto em seu desempenho é significativo (linhas 11-12).

Com a variação de Δ , um aspecto interessante pode ser observado: com o aumento do intervalo de tempo entre inspeções na primeira fase (linha 14), o desempenho da política recomendada é levemente superior ao desempenho da política recomendada para o caso base. Com a redução do intervalo (linha 13), o inverso é verificado.

Com relação à distribuição de probabilidade de H , observa-se que com o aumento de η_2 , maior tende a ser o T_{PP} recomendado e menor o C_T resultante (linhas 15-18). Isso ocorre porque o *delay-time* representa uma janela de oportunidade para identificação do defeito e prevenção da falha. Quanto menor essa janela de oportunidade, mais difícil identificar o defeito antes da ocorrência da falha então, em resposta, a tendência é se recomendar a realização de inspeções com maior frequência ou a programação da substituição preventiva para mais cedo. Já com relação da distribuição de probabilidade de X , observa-se que com a redução de η_1 , a política de manutenção recomendada tende a indicar um maior número de inspeções na segunda fase, e com fator de correção significativamente alto, de forma a aumentar a probabilidade de detecção do defeito antes da ocorrência da falha, uma vez que este tende a ocorrer mais cedo (linhas 19-20).

6 CONCLUSÕES

O gerenciamento adequado da manutenção tem se mostrado cada vez mais importante na busca por competitividade. Nesse cenário, este trabalho apresenta um modelo de política de inspeções com intervalos variáveis, voltado para sistemas críticos, onde a ocorrência de falhas pode incorrer em grandes prejuízos financeiros, danos a trabalhadores, entre outros impactos.

Foi construído um modelo de simulação para um sistema simples (um componente), cujo processo de deterioração e falha pode ser modelado conforme o conceito *delay-time*. Para a busca de soluções e recomendação da política de manutenção, foi considerado como critério de decisão o custo por unidade de tempo esperado no longo prazo.

O modelo desenvolvido foi aplicado em um estudo de caso sobre um sistema de elevação de carga, onde foi considerado o cabo de aço como componente crítico a ser estudado. Com base em normas técnicas e análise do caso estudado, foram estipulados valores para os parâmetros de entrada do modelo, a partir dos quais foram definidos os parâmetros de entrada a serem considerados para uma análise de sensibilidade. Observou-se que o modelo se comporta como esperado, e as políticas recomendadas tendem a se adequar da melhor forma para cada cenário testado.

Em praticamente todos os cenários analisados, observa-se que há recomendação para realização de inspeções na segunda fase da política proposta, com variação nos intervalos de tempo entre inspeções. Isso demonstra que o modelo de política apresentado pode contribuir para obtenção de melhores resultados, o que compensa o aumento do nível de dificuldade gerencial.

A utilização adequada do modelo pode fornecer aumento no desempenho da manutenção, podendo ser um diferencial na busca por competitividade no cenário industrial atual.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. T.; SOUZA, F. M. C. **Gestão da Manutenção – Na Direção da Competitividade**. Ed. Universitária, UFPE, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4309**: Guindastes, Cabos de Aço – Critérios de inspeção e descarte. Rio de Janeiro. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e Mantabilidade. Rio de Janeiro. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6327**: Cabos de aço para uso geral- Requisitos mínimos. Rio de Janeiro. 2006.
- BAKER, R. D.; WANG, W. Developing and testing the delay time model. **Journal of Operational Research Society**, v. 44, n. 4, p. 361–374, 1993.
- BARLOW, R. E.; HUNTER, L. C; PROSCHAN, F. Optimum checking procedures. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 4, p. 1078-1095, 1963.
- BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. **Mathematical Theory of Reliability**. New York: Wiley, 1965.
- BAZZO, W.A. **Introdução à Engenharia**. 6ª ed., Santa Catarina: Editora da UFSC, 2002.
- CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. DE. Modelo multicritério de apoio à decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, v. 25, n. 2, p. 279–296, 2005.
- CAVALCANTE, C. A. V.; SCARF, P. A.; ALMEIDA, A. T. A study of a two-phase inspection policy for a preparedness system with a defective state and heterogeneous lifetime. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 6, p. 627–635, 2011.
- CHRISTER, A. H. Innovative decision making. In: BOWEN, K. C.; WHITE, D. J. **Proceedings of the NATO conference on the role and effectiveness of theories of decision in practice**. Hodder and Stoughton; p. 368–77, 1976.
- CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 35, p. 401-406, 1984.
- CHRISTER, A. H. Developments in delay time analysis for modeling plant maintenance. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, p. 1120-1137, 1999.
- CIMAF. **Manual Técnico de Cabos**. Osasco, 2009. Disponível em <<http://www.norminha.net.br/Arquivos/Arquivos/Manualtecnicodecabosdeau00E7o.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2018.
- COOKE, R. M. The design of reliability data basis, part I: a review of standard design concepts. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 51, p. 137-146, 1996.
- CRUZADO, A.; HARTELT, M.; WASCHE, R.; URCHEGUI, M. A.; GÓMEZ, X. Fretting wear of thin steel wires. Part 2: Influence of crossing angle. **Wear**, v. 273, p. 60-69, 2011.
- CRUZADO, A.; URCHEGUI, M.A.; GÓMEZ, X. Finite elemento modeling and experimental validation of fretting wear scars in thin steel wires. **Wear**, v. 289, p. 26-38, 2012.

- DEKKER, R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. **Reliability Engineering and System safety**, v. 51, n. 93, p. 229-240, 1996.
- DHILLON, B. S. **Engineering Maintenance: A Modern Approach**. CRC Press Boca Raton, FL, 2002.
- FREITAS, M. A, COLOSIMO, E. A. Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados, Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1997, 326p.
- GEBRAEEL, N. Z.; LAWLEY, N. A. A Neural Network Degradation Model for Computing and Updating Residual Life Distributions. **IEEE Transactions on Automated Science and Engineering**, v. 5, n. 4, 2008.
- GERTSBAKH, I. B.; KORDONSKIY, K. B. **Models of Failure**. Springer-Verlag: New York Inc, 1969.
- HOBBS, R. E. RAOOF, M. Mechanism of fretting fatigue in steel cables. **Fatigue**, v. 16, 1994.
- HOSSEINI, M. M.; KERR, R. M.; RANDALL, R. B. A hybrid maintenance model with imperfect inspection for a system with deterioration and Poisson failure. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, p. 1229-1243, 1999.
- JIA, X., CHRISTER, A. H. Case Experience Comparing the RCM Approach to Plant Maintenance with a Modeling Approach. **Case Studies in Reliability and Maintenance**, p. 477-494, 2003.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro – RJ:Qualitymark Ed., 2001.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade**. Editora Qualitymark, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- LIAO, W.; PAN, E; XI, L. Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration. **Journal of Intelligent Manufacturing**. v. 21, p. 875-884, 2010.
- LOPES, R. S.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H. Delay-time inspection model with dimensioning maintenance teams: a study of a company leasing construction equipment. **Computers and Industrial Engineering**, v. 88, p.341-349, 2015.
- MELLO, B. A. **Modelagem e simulação de sistemas**. Santo Ângelo, 2007.
- MENDES, A. C. **Aplicação da Simulação de teoria de filas nos estudos de confiabilidade e otimização de equipes de manutenção**. 20º Congresso Brasileiro de Manutenção - ABRAMAN, 2005. Disponível em: < <http://www.abraman.org.br/arquivos/106/106.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. LTC, ed. 2, Rio de Janeiro, 1983.
- MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N. L. **Manutenção: Combate aos custos de não-eficácia – A vez do Brasil**. São Paulo: Makron Books, 1993.
- MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance**. New York: Industrial Press, 1997.

- MOUBRAY, J. MCCII – **Reliability – Centered Maintenance**. Second edition, New York: Industrial Press Inc., 2000.
- MUNFORD, A. G.; SHAHANI, A. K. A Nearly Optimal Inspection Policy. **Operational Research Quarterly**, v. 23, n. 3, p. 373-397, 1972.
- MUNFORD, A. G.; SHAHANI, A. K. An Inspection Policy for the Weibull Case. **Operational Research Quarterly**, v. 24, n. 3, p. 453-458, 1973.
- MUNFORD, A. G. Comparison among Certain Inspection Policies. **Management Science**, vol. 27, n.3, p. 260-267, 1981.
- NAKAJIMA, Seiichi. **Introdução ao TPM - Total Productive Maintenance**. Trad. Mário Nishimura. São Paulo: IMC Internacional Sistemas Educativos, 1989.
- NELSON, W. **Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses**. John Wiley & Sons, 1990.
- PARK, D. H.; JUNG, G. M.; YUM, J. K. Cost minimization for periodic maintenance policy of a system subject to slow degradation. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 68, p. 105-112, 2000.
- PINJALA, S.H.; PINTELON, L.; VEREECKE, A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. *Int. J. Production Economics*, v. 104, p. 214-229, 2006.
- PINTELON, L.; GELDERS, L.; VANPUYVELDE, F. **Maintenance Management**, 2 ed. Leuven: Acco Belgium, 2000.
- SCARF, P.A. On the application of mathematical models in maintenance. **European Journal of Operational Research**, v. 99, p. 493–506, 1997.
- SCHER, H.; FEINGOLD, H. **Repairable systems reliability**. New York: Marcel Dekker, 1984.
- SIQUEIRA, I. P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**. Ed Qualitymark, Rio de Janeiro, 2009.
- SINGH, R. P.; MALLICK, M.; VERMA, M. K. Studies on failure behavior of wire rope used in underground coal mines. **Engineering Failure Analysis**, v. 70, p. 290-304, 2016.
- SWANSON, L. An empirical study of the relationship between production technology and maintenance management. **International Journal of Production Economics**, v. 53, p. 191-207, 1997.
- TOKAR, M. ARZENSEK, B. Failure of crane wire rope. **Engineering Failure Analysis**, v.9, p. 227-233, 2002.
- WANG, W. Delay time modelling. In: MUTHY, D. N. P.; KOBACZY, A. K. S. (Orgs.) **Complex System Maintenance Handbook**. London: Springer, 2008. p. 345–370.
- WANG, W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the delay-time concept. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 96, p. 1535-1541, 2011.
- WANG, W.; BANJEVIC, D. Ergodicity of forward times of the renewal process in a block-based inspection model using the delay time concept. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 100, p. 1-7, 2012.

WANG, W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 106, p. 165-178, 2012.

WANG, D.; ZHANG, D.; ZHANG, Z.; GE, S. Effect of various kinematic parameters of mine hoist on fretting parameters of hoisting rope and a new fretting fatigue test apparatus of steel wires. **Engineering Failure Analysis**, v.22, p. 92-112, 2012.

WANG, W, CARR, M.; CHOW, T.; PECHT, M. A two-level inspection model with technological insertions. **IEEE Transactions Reliability**, v. 61, n. 2, p. 479-490, 2012.

XENOS, H. G.P. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Nova Lima, Editora: INDG, 2004.

ZHANG, D. K.; GE, S. R.; QIANG, Y. H. Research on the fatigue and fracture behavior due to the fretting wear of steel wire in hoisting rope. **Wear**, v.255, p. 1233-1237, 2003.

ZIO, E. Reliability engineering: Old problems and new challenges. **Reliability Engineering and System Safety**, v .94, p. 125-141, 2009.