

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE MANUTENÇÃO
VIA ALGORÍTMO GENÉTICO APLICADO EM UMA LINHA DE
PRODUÇÃO DE ELASTÔMERO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

HELDER HENRIQUE LIMA DINIZ

Orientador: Enrique López Droguett, Ph.D.

RECIFE, Agosto / 2007

D585m Diniz, Helder Henrique Lima

Modelo de otimização do custo de manutenção via algoritmo genético aplicado em uma linha de produção de elastômero / Helder Henrique Lima Diniz. – Recife: O Autor, 2007.

x, 93 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2007.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia de Produção. 2. Engenharia de confiabilidade. 3. Diagramas de blocos. 4. Algoritmos Genéticos. 5. Custo de manutenção. 6. Política de manutenção. I. Título.

658.5 CDD (22.ed.)

UFPE/BCTG/2007-135



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

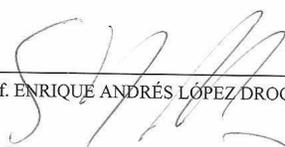
HELDER HENRIQUE LIMA DINIZ

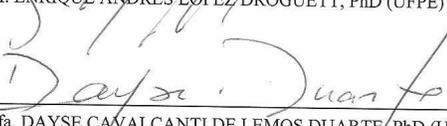
**“Modelo de Otimização do Custo de Manutenção Via Algoritmo Genético Aplicado em
uma Linha de Produção de Elastômero”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato **HELDER HENRIQUE LIMA DINIZ APROVADO.**

Recife, 17 de agosto de 2007.


Prof. ENRIQUE ANDRÉS LÓPEZ DROGUETT, PhD (UFPE)


Prof.ª. DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE, PhD (UFPE)


Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

PÁGINA DEDICATÓRIA

Esta dissertação é dedicada aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Joantina Diniz e João Diniz. Agradeço à minha família em geral.

Agradeço ao professor Enrique López por ter acreditado em mim.

Agradeço também a todos que compõem o grupo de pesquisa RISCTEC, especialmente à professora Dayse Duarte, Ricardo José Ferreira e Paulo Firmino

Agradeço aos professores membros da banca, pelas sugestões valiosas.

Agradeço a todos meus amigos, especialmente a Márcio Moura, Bruno da Fonte Leite, Andréa Pontual de Oliveira, Sérgio Parente e Isis Lins.

A todos amigos e companheiros de profissão, com quem pude conviver durante esse período e pelos quais tenho grande apreço e admiração.

Ao meu ex-chefe e amigo Paulo Estevão, que me deu a oportunidade de iniciar a carreira na área de engenharia de produção.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente me ajudaram no desenvolvimento do presente trabalho.

RESUMO

Este trabalho desenvolve um modelo para otimização do custo de manutenção baseado na integração entre diagrama de Blocos e algoritmos de computação evolucionária, mais especificamente algoritmos genéticos. Os diagramas de blocos são comumente utilizados na avaliação de confiabilidade de sistemas. No caso dos algoritmos genéticos, a teoria se baseia inicialmente na geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções para um problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada e para cada indivíduo é dado um índice, refletindo sua habilidade de adaptação a um determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Os indivíduos selecionados sofrem modificações em suas características fundamentais através de mutações e cruzamentos genéticos, gerando descendentes para a próxima geração. A integração entre esses dois modelos tem o objetivo de determinar qual a política de manutenção preventiva (intervalos entre manutenções) que otimiza os custos de manutenção. Em outras palavras, deseja-se otimizar os custos das atividades de manutenção, sujeito às restrições internas ou externas ao processo, utilizando para isso algoritmos genéticos. O Modelo será aplicado em dois sistemas: em um sistema piloto com fins de visualização dos resultados que o modelo fornece e em uma linha de produção de secagem de Elastômero.

Palavras-chave: Engenharia de Confiabilidade, Diagramas de blocos, Algoritmos Genéticos, Custo de Manutenção e Política de manutenção.

ABSTRACT

This work develops a model of maintenance cost optimization concerns on the integration between Block Diagrams and Evolutionary Computation Algorithms, more specifically Genetic Algorithms. The Block diagrams are commonly used in the assessment of the system's reliability. In Genetic Algorithms case, the theory has a basis initially on the generation of a population formed by a random set of individuals that can be seen as possible solutions for a problem. Along the evolutive process, this population is evaluated and for each individual is given an index, reflecting your skill to adaptation in a determined ambient. A percentage of the more suitable is maintained, while the others are throw out. The selected individuals are modified in your fundamental features through genetic mutations and crossovers, generating offspring to the next generation. The integration between these two models has the objective to determine which the preventive maintenance policy (interval between maintenances) that optimizes the maintenance costs. In other words, the objective is optimize the costs of the activities of the maintenance, subject to internal or external restrictions to the process, using to this genetic algorithms. The Model will be applied in two systems: a pilot system with to verify the results that the model yields and a system of elastomer dry production.

Keywords Reliability Engineering, semi Block Diagram, Genetic Algoritihms, Maintenance policy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE	19
FIGURA 2-2 – FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA.....	19
FIGURA 2-3 – REPRESENTAÇÃO DE UM DIAGRAMA DE BLOCOS	21
FIGURA 2-4 – DIAGRAMA DE BLOCOS EM SÉRIE	21
FIGURA 2-5 – DIAGRAMA DE BLOCOS EM PARALELO.....	22
FIGURA 2-6 – DIAGRAMA DE BLOCOS EM SÉRIE-PARALELO.....	23
FIGURA 2-7 - SELEÇÃO POR ROLETA.....	34
FIGURA 2-8 CROSSOVER DE UM ÚNICO PONTO PARA CADEIAS DE COMPRIMENTO $L = 8$	35
FIGURA 2-9: FLUXOGRAMA DO MÉTODO DO ALGORITMO GENÉTICO.....	37
FIGURA 3-1 – CONFIGURAÇÃO GENÉTICA DO SISTEMA PARA O TEMPO DE MISSÃO T.	45
FIGURA 3-2 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA PILOTO.....	46
FIGURA 3-3 – CONFIABILIDADE DO COMPONENTE 1 DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 1	48
FIGURA 3-4 – CONFIABILIDADE DO COMPONENTE 2 DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 1	49
FIGURA 3-5 – CONFIABILIDADE DO COMPONENTE 3 DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 1	49
FIGURA 3-6 – CONFIABILIDADE DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 1	50
FIGURA 3-7 – CONFIABILIDADE DO COMPONENTE 1 DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 2.....	51
FIGURA 3-8 – CONFIABILIDADE DO COMPONENTE 2 DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 2.....	51
FIGURA 3-9 – CONFIABILIDADE DO COMPONENTE 3 DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 2.....	52
FIGURA 3-10 – CONFIABILIDADE DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 2	52
FIGURA 4-1 – REPRESENTAÇÃO DA ÉTAPA DE COAGULAÇÃO DE ELASTÔMEROS.....	59
FIGURA 4-2 – REPRESENTAÇÃO DA ÉTAPA DE SECAGEM DE ELASTÔMEROS.....	60
FIGURA 4-3 – MÁQUINA DESAGUADORA DE ELASTÔMERO FONTE: FRENCH OIL (2006).....	61
FIGURA 4-4 – UMA MÁQUINA SECADORA DE ELASTÔMERO FONTE: FRENCH OIL (2006)	61
FIGURA 4-5 – BASE DO TRANSPORTADOR VIBRATÓRIO FONTE: CARRIER (2006)	62
FIGURA 4-6 – TRANSPORTADOR VIBRATÓRIO (FONTE: CARRIER,2006).....	63
FIGURA 4-7 – TRANSPORTADORES HELICOIDAIS (FONTE: CARRIER)	63
FIGURA 4-8 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA PRENSA.....	64
FIGURA 4-9 – DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O SISTEMA EM ESTUDO.....	65
FIGURA 4-101 – GRÁFICO DO NÚMERO DE FALHAS AO LONGO DO TEMPO DO HOT BOX.....	68
FIGURA 4-11 – GRÁFICO DO NÚMERO DE FALHAS AO LONGO DO TEMPO DA DESAGUADORA	71
FIGURA 4-12 – GRÁFICO DO NÚMERO DE FALHAS AO LONGO DO TEMPO DA SECADORA	72
FIGURA 4-13 – GRÁFICO DO NÚMERO DE FALHAS AO LONGO DO TEMPO DO MOINHO	73
FIGURA 4-14 – GRÁFICO DO NÚMERO DE FALHAS AO LONGO DO TEMPO DA ESTEIRA ALPHA	74
FIGURA 4-15 – PENEIRA	80
FIGURA 4-16 – DESAGUADORA.....	80
FIGURA 4-17 – SECADORA	80
FIGURA 4-18 – HOT BOX	80
FIGURA 4-19 – SPYRAL.....	80
FIGURA 4-20- MOINHO.....	80
FIGURA 4-21 – ESTEIRA ALPHA	80
FIGURA 4-22 – ESTEIRA BETA.....	80
FIGURA 4-23 – COAGULAÇÃO.....	81
FIGURA 4-24 – EMABALADEIRA	81
FIGURA 4-25 – PRENSA 1	81
FIGURA 4-26 – PRENSA 2	81
FIGURA 4-27 – CONFIABILIDADE DO SISTEMA EM UM TEMPO DE MISSÃO DE DOIS DIAS	81
FIGURA 5-1 – TEMPO ENTRE FALHAS	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 3-1- DISTRIBUIÇÃO E TAXA DE FALHAS POR COMPONENTE DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 1	46
TABELA 3-2- DISTRIBUIÇÃO E TAXA DE FALHAS POR COMPONENTE DO SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 2	47
TABELA 3-3 –CUSTO POR TIPO DE MANUTENÇÃO.....	47
TABELA 3-4 PARÂMETRO DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO.....	47
TABELA 3-5 – CONFIGURAÇÃO DA POLÍTICA ÓTIMA PARA O SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 1	48
TABELA 3-6 – CONFIGURAÇÃO DA POLÍTICA ÓTIMA PARA O SISTEMA PILOTO – CENÁRIO 2.....	50
TABELA 4-1 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO SUBSISTEMA DE COAGULAÇÃO.....	67
TABELA 4-2 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO PENEIRA	67
TABELA 4-3 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO HOT BOX.....	68
TABELA 4-4 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO TRANSPORTADOR VERTICAL.....	69
TABELA 4-5 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO ESTEIRA BETA.....	69
TABELA 4-6 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO EMBALADEIRA	70
TABELA 4-7 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO PRENSA 1	70
TABELA 4-8 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO MÁQUINA DESAGUADORA	70
TABELA 4-9 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO MÁQUINA SECADORA	71
TABELA 4-10 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO MOINHO	72
TABELA 4-11 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO ESTEIRA ALPHA	73
TABELA 4-12 – VALORES REFERENTES AO ESTUDO DO EQUIPAMENTO PRENSA 2	74
TABELA 4-13 – ESTATÍSTICA DOS TESTES DE TENDÊNCIA	75
TABELA 4-14 – P-VALOR DOS TESTES DE TENDÊNCIA	75
TABELA 4-15 – PROBABILIDADE DE OBTENÇÃO DE UM EQUIPAMENTO VOLTAR TÃO BOM QUANTO NOVO	77
TABELA 4-16 – MÉDIA POR SUBSISTEMA E SUA RESPECTIVA TAXA DE FALHA.....	78
TABELA 4-17 – CONFIABILIDADE POR COMPONENTE PARA UM TEMPO DE MISSÃO DE DOIS DIAS.	78
TABELA 4-18 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM O ALGORITMO DESENVOLVIDO	79

LISTA DE ACRÔNIMOS

CDF – *Cumulative Distribution Function* (Função de Distribuição Acumulada)
ventos)

MTBF – *Mean Time Between Failures* (Tempo Médio entre Falhas)

MTTF – *Mean Time To Failure* (Tempo Médio para Falha)

MTTR – *Mean Time To Repair* (Tempo Médio para Reparo)

PDF – *Probability Density Function* (Função Densidade de Probabilidade)

PHP - Processo Homogêneo de Poisson

PR - Processo de Renovação

PNHP - Processo Não Homogêneo de Poisson

ROCOF – *Rate of Occurrence Failure* (Taxa de Ocorrência de Falhas)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO GERAL	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1.	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	17
2.1.1.	FUNÇÃO CONFIABILIDADE	18
2.1.2.	FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA (CDF)	19
2.1.3.	CONCEITO DE DISPONIBILIDADE	20
2.1.4.	CONCEITO DE MANUTENIBILIDADE.....	20
2.2.	DIAGRAMA DE BLOCOS	20
2.2.1.	SISTEMAS EM SÉRIE.....	21
2.2.2.	SISTEMAS EM PARALELO	22
2.2.3.	SISTEMAS EM SÉRIE-PARALELO.....	22
2.3.	PROCESSOS ESTOCÁSTICOS	23
2.3.1.	PROCESSO DE POISSON HOMOGÊNEO (HPP)	23
2.3.2.	PROCESSO DE POISSON NÃO – HOMOGÊNEO (NHPP)	24
2.3.3.	A DISTRIBUIÇÃO WEIBULL E O PROCESSO POWER LAW	24
2.3.4.	TESTES DE TENDÊNCIA	26
2.3.4.1.	TESTE DE LAPLACE	26
2.3.4.2.	TESTE MIL-HDBK-189	27
2.3.5.	TESTES DE ADERÊNCIA	28
2.3.5.1.	TESTE DE CRAMÉR VON MISES E ESTIMAÇÃO DE CURVAS	28
2.3.5.2.	TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	29
2.4.	TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO	29
2.4.1.	GERAÇÃO DE VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	29
2.4.2.	MÉTODO DA INVERSÃO	30
2.4.2.1.	INVERSA DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL.....	30
2.4.2.2.	INVERSA DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	30
2.5.	ALGORITMOS GENÉTICOS	31
2.5.1.	CODIFICAÇÃO	33
2.5.2.	INICIALIZAÇÃO.....	33
2.5.3.	SELEÇÃO	34
2.5.4.	CROSSOVER	35
2.5.5.	MUTAÇÃO.....	35
2.5.6.	APRESENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO	36
2.5.7.	ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OTIMIZAÇÃO DA CONFIABILIDADE E CUSTO DE MANUTENÇÃO	37
2.5.7.1.	MODELO DE CONFIABILIDADE PARA UM EQUIPAMENTO QUE POSSUI UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROGRAMADA	37
2.5.7.2.	MODELO DE CUSTO.....	39
2.5.7.3.	FUNÇÃO OBJETIVO.....	40
3.	MODELO PROPOSTO	41
3.1.	MODELO DE CONFIABILIDADE	41
3.2.	MODELO DE CUSTO PROPOSTO.....	41
3.3.	NÚMERO ESPERADO DE FALHAS ENTRE MANUTENÇÕES	42
3.4.	FUNÇÃO OBJETIVO PROPOSTA.....	44
3.5.	ALGORITMOS GENÉTICOS NO MODELO PROPOSTO.....	44
3.6.	APRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO.....	46
3.6.1.	RESULTADOS DO SISTEMA PILOTO.....	48
4.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	54

4.1.	INTRODUÇÃO AO ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO	54
4.2.	PROCESSOS DE POLIMERIZAÇÃO	55
4.3.	ETAPAS DE PRODUÇÃO DE ELASTÔMEROS	57
4.3.1.	<i>Reação</i>	57
4.3.2.	<i>Coagulação</i>	57
4.3.3.	<i>Secagem Mecânica</i>	59
4.4.	ANÁLISE DE DADOS	65
4.4.1.	<i>Descrição do Problema</i>	65
4.4.2.	<i>Aplicação dos testes</i>	66
4.4.3.	<i>Resultado dos testes</i>	66
4.4.3.1.	<i>Modelagem HPP</i>	66
4.4.3.2.	<i>Modelagem NHPP</i>	71
4.4.3.3.	<i>Eficácia e Eficiência da manutenção</i>	76
4.4.3.4.	<i>Taxas de Falhas</i>	77
4.4.3.5.	<i>Análise da Confiabilidade</i>	78
4.5.	OBTENÇÃO DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO ÓTIMA	79
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
5.1	CONCLUSÕES	87
5.1.1.	MODELO PROPOSTO	87
5.1.2.	ESTUDO DE CASO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
5.2.	SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a otimização dos processos, e em particular a confiabilidade de sistemas e os custos de manutenção é recorrente . O motivo é simples: a ocorrência de falhas (eventos indesejáveis) pode resultar na perda de vidas humanas, patrimônio ou poder.

Com a modernização constante dos sistemas produtivos, os processos tendem a ser cada vez mais exigidos em índices de confiabilidade e redução de custos, fazendo com que seja extremamente importante considerar quaisquer atividades, sejam elas previstas ou imprevistas que provoquem paradas no sistema produtivo SHERWIN (2000). Segundo MOUBRAY (1991), períodos de paralisação sempre afetam a capacidade produtiva dos ativos físicos por reduzir a quantidade de produtos, aumentarem os custos operacionais e interferir com o serviço ao cliente. Segundo a Associação Brasileira de Manutenção (Abraman), os custos com atividade de manutenção no país representam 4,2% do PIB (Produto interno bruto), o equivalente a US\$ 35 bilhões anuais. Outro dado interessante é que cerca de 4% do faturamento das empresas são gastos com manutenção. Nestes custos estão incorporados gastos com mão de obra, peças sobressalentes e contratação de serviços. Também foram inclusos os gastos adicionais com horas extras dos funcionários da manutenção, em decorrência das paradas imprevistas causadas por manutenções corretivas, e compra de materiais e serviços de manutenção em situações de emergência.

Na manufatura, os efeitos dos períodos de paralisação foram se agravando pela tendência mundial de utilizar sistemas *just in time*, onde estoques reduzidos para a produção em andamento significam que pequenas paradas na produção são agora mais prováveis de parar a planta inteira. Como resultado, os processos pelos quais estas falhas ocorrem e o que deve ser feito para gerenciá-las estão se tornando prioridades, especialmente quando se tornam firmemente aparentes quantas falhas são causadas pelas muitas atividades as quais supomos preveni-las.

Neste trabalho, é desenvolvida uma ferramenta de apoio às decisões relacionadas com a definição do planejamento das paradas de manutenção preventiva, cujo modelo será aplicado de uma linha de produção de elastômeros.

A avaliação da confiabilidade do sistema estudado neste trabalho será realizada através de diagramas de blocos. Para a otimização do tempo entre reparos, baseado no mínimo custo, será utilizado o conceito de computação evolucionária, mais especificamente algoritmos genéticos (AG), cuja técnica de otimização se baseia no fato de que indivíduos com boas

características genéticas têm maiores chances de sobrevivência e de produzirem indivíduos cada vez mais aptos, enquanto indivíduos menos aptos tendem a desaparecer (MICHALEWICZ (1996)).

Os AG's diferem da maioria de técnicas de otimização porque ele busca uma solução ótima de uma população global de possíveis soluções, em vez de uma única solução pontual BUSACCA (2001). Algumas técnicas de busca e otimização tradicionais, como o simplex, iniciam-se com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando algumas heurísticas (estáticas) diretamente associadas ao problema a ser solucionado. Estes processos heurísticos não são algorítmicos e sua simulação em computadores pode ser muito complexa. Por outro lado, as técnicas de computação evolucionária operam sobre uma população de candidatos em paralelo. Assim, elas podem fazer a busca em diferentes áreas do espaço de solução, alocando um número de membros apropriado para a busca em várias regiões.

Aplicações para otimizar políticas de manutenção podem ser encontradas na literatura como em HILSMEIER (1995), onde o enfoque foi a avaliação da confiabilidade de sistemas com equipamentos em Stand-by. VAN NOORTWIJK et al. (1992) Aplicou a opinião do especialista para avaliar a qualidade dos serviços de manutenção. CHIANG JH (2001) realizou a proposta de otimizar a manutenção obtendo a disponibilidade via Processo de Markov. MUÑOZ A (1997) foi um dos primeiros a propor o uso de algoritmos genéticos na otimização de políticas de manutenção. LAPA et al. (1999) realizou aplicação de algoritmos genéticos para otimizar inspeções planejadas em equipamentos.

Através desse estudo poderão ser fornecidas ferramentas para que o engenheiro de manutenção possa quantificar e otimizar o desempenho das atividades de manutenção, fornecerá também dados para que o projetista de equipamentos e componentes, possa garantir um melhor desempenho dos equipamentos.

A aplicação da metodologia proposta visa determinar uma melhor configuração para os sistemas, contemplando a análise de confiabilidade e manutenibilidade, fornecendo informações relacionadas da confiabilidade e os custos de manutenção, como também possibilitar a escolha de uma política ótima de manutenção baseado no menor custo.

1.1 Justificativa

As ações de manutenção são adotadas para proporcionar maior tempo disponível das máquinas em uso no “chão de fábrica” a um custo mais acessível. Este trabalho desenvolve um modelo para otimização das manutenções preventivas, devido à necessidade da redução dos custos, causado pela busca incessante do incremento da eficiência nos processos.

Altos níveis de confiabilidade dos sistemas fazem com que o “lead time” de produção seja reduzido, assim como o nível de estoques intermediários (gargalos), e os custos unitários de produção BLACHE (1994).

Segundo MOUBRAY (1991), devido ao aumento do número e da diversidade dos itens físicos (equipamento, instalações, construções) a manutenção tem sido vista como uma função estratégica em diversas instituições. O papel da manutenção está no fato de levar sistemas de um estado indisponível a um estado de disponibilidade através de reparos ou substituição de seus componentes. Cada vez mais os projetos e equipamentos vem se tornando muito mais complexos e de elevado custo de aquisição, fazendo com que a indisponibilidade de um sistema seja de uma perda grandiosa.

Na Europa, está se aproximando o ponto onde as organizações ou se conformam com as expectativas de segurança e de conservação ambiental, ou cessam de funcionar. Isso acrescenta uma ordem de grandeza à nossa dependência quanto à integridade de itens físicos – que vai além do custo e que torna uma questão básica de sobrevivência organizacional.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta para apoiar a elaboração de cronogramas de paradas de manutenção preventivas, utilizando um modelo matemático de otimização, focando na redução de custo de manutenção, e considerando as principais variáveis relacionadas com os diversos aspectos envolvidos no problema.

Deseja-se também avaliar a confiabilidade de sistemas via diagrama de blocos. Terá ainda a finalidade de suprir necessidades atuais de empresas para elaboração de políticas de manutenção, dando apoio a tomada de decisão quanto a estratégia de manutenção.

A metodologia a ser desenvolvida será então aplicada dentro do contexto de custos de manutenção e confiabilidade de equipamentos.

Será desenvolvida uma aplicação, onde será modelado um sistema, para aquisição das métricas de confiabilidade e o custo de manutenção ótimo.

1.3 Objetivos Específicos

- Revisão das técnicas de análise de confiabilidade de sistemas existentes na literatura;

- Revisão das técnicas existentes na literatura de otimização baseadas em algoritmos evolucionários , especificamente algoritmos genéticos;
- Elaborar uma metodologia para implementar política de manutenção de sistemas, baseado no mínimo custo de manutenção;
- Definir intervalos de manutenções preventivas;
- Definir o custo ótimo de manutenção preventiva;
- Analisar a relação custo de produção vs confiabilidade;
- Desenvolver uma aplicação, onde um sistema de coagulação e Secagem de Elastômeros será modelado para aquisição das métricas de confiabilidade, como também um política ótima de manutenção preventiva baseado no menor custo;

1.4 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2, a fim de facilitar a compreensão do leitor sobre o que é tratado nesta dissertação, são expostos alguns conceitos básicos necessários a compreensão do que é discutido nesta dissertação. Serão expostos conceitos relacionados a engenharia de confiabilidade, processos estocásticos, técnicas de simulação e algoritmos genéticos, que são a base fundamental para utilização do modelo proposto. Após a fundamentação teórica, o capítulo 3 abordará o desenvolvimento do modelo proposto, onde o principal objetivo é otimizar o custo de manutenção de sistemas. Para atingir esse objetivo, o modelo utiliza a abordagem de otimizar o tempo entre manutenções preventivas, baseado no mínimo custo. A técnica de otimização utilizada foi algoritmo genético, que faz uma analogia a teoria da evolução de Darwin, onde as espécies evoluem pelo princípio da seleção natural e sobrevivência dos indivíduos mais aptos. Ainda em relação ao modelo, nesse capítulo foi exposto o método para obtenção do número esperado de falhas, que foi obtido através do método da inversão. No capítulo 4, a metodologia foi aplicada em um estudo de caso. E, por fim, no último capítulo, será realizada uma ilação dos principais pontos abordados neste trabalho, avaliando as conclusões e trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento do conhecimento faz-se necessário para que o resultado esperado seja atingido. Serão apresentados alguns tópicos que se faz necessário para contextualizar o problema apresentado.

2.1. Engenharia de Confiabilidade

Um produto confiável é aquele em que o consumidor pode contar para realizar o que ele espera do mesmo por um período de tempo. Um sistema perfeito é constituído de componentes que durante um período pré-determinado de tempo desenvolvem a atividade para qual foi projetado sem ocorrências de falhas RAUSAND (1996).

Porém, alguns fatores são limitantes para desenvolvimento desses sistemas perfeitos:

- Elevados custos de desenvolvimento, materiais, testes, entre outras etapas do projeto, tornam economicamente inviável a construção desse sistema;
- Engenheiros de Projeto não têm conhecimento total das condições de trabalho, de produção e manutenção de tais componentes;
- Devido a essas limitações econômicas e práticas, componentes e sistemas não são perfeitos, ocasionando uma probabilidade de falha durante seu tempo de missão (intervalo de tempo de interesse no qual se quer avaliar o comportamento de um sistema).

Segundo MODARRES (1999), confiabilidade é a habilidade de um item (produto ou sistema) operar com sucesso sob determinadas condições por um período designado de tempo.

Todo sistema tem uma capacidade inerente de resistir a determinadas condições internas (intrínseca ao processo) e as externas (resultante do trabalho desenvolvido em um determinado cenário). Essas condições podem ser causadas por agentes como o stress e o tempo. Análise de dados de como e por que estes agentes conduzem às falhas é um dos objetivos da engenharia de confiabilidade. tempo de missão é o intervalo de tempo de interesse no qual se quer avaliar o comportamento de um sistema

De uma forma geral, a análise de confiabilidade segue alguns fatores como a definição do cenário estudado, a quantificação dos dados em termos de probabilidade, a determinação do tempo de operação e características inerentes ao meio onde vai funcionar o sistema, tais como, pressão, temperatura, vibração entre outras.

Segundo LAFRAIA (2001), existem alguns benefícios na aplicação da confiabilidade:

- Fornecer soluções às necessidades atuais das indústrias como: Aumentar a

produção de produtos (redução de paradas não programadas), flexibilidade para utilização de diversos tipos de carga, responder rapidamente às mudanças nas especificações dos produtos;

- Permitir a aplicação de investimentos com base em informações quantitativas, segurança e meio ambiente;
- Eliminação de causas básicas de paradas não programadas de indústrias ou instalação;
- Atuação nas causas básicas dos problemas e não nos sintomas através de: histórico de falhas dos equipamentos, prevenção de falhas em equipamentos similares e determinação de fatores críticos para manutenibilidade de equipamentos;

2.1.1. Função Confiabilidade

A análise de confiabilidade é analisada por métodos quantitativos que tratam a probabilidade de um item realizar uma determinada função com sucesso em um dado período de tempo sob condições específicas.

Sendo T a variável aleatória contínua que expressa o tempo de falha do componente, $T \geq 0$, a Função de Confiabilidade, $R(t)$, pode ser expressa como:

$$R(t) = P(T \geq t); t \geq 0 \quad \text{Equação 2-1}$$

$R(t)$ – função confiabilidade;

T – variável aleatória;

t – tempo da missão, cuja confiabilidade deve ser avaliada.

As propriedades da função confiabilidade são:

$$R(t = 0) = 1 \quad \text{Equação 2-2}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \quad \text{Equação 2-3}$$

$$R(t) \geq 0, \quad \forall t \geq 0 \quad \text{Equação 2-4}$$

Podemos interpretar a função confiabilidade como a probabilidade que um determinado componente esteja $R(t)$ operando em t ou $R(t)$ é a fração esperada da população que está operacional em t.

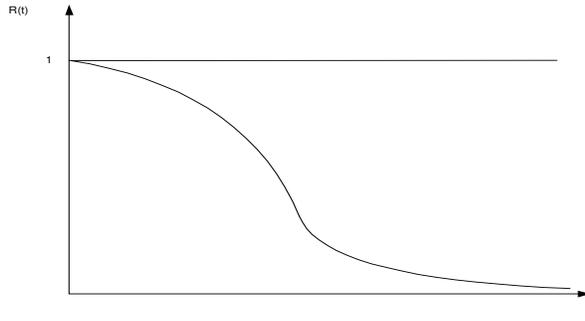


Figura 2-1 – Função de Confiabilidade

2.1.2. Função distribuição acumulada (CDF)

$$F(T=0)=0$$

Equação 2-5

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (F(t)) = 1$$

Equação 2-6

Onde:

F(t) – função acumulada de falha

P(T≤t) – probabilidade de falha para uma missão de duração t;

Algumas propriedades importantes da CDF são:

$$R(t)+F(t)=1 \therefore$$

Equação 2-7

$$F(t)=1-R(t) \therefore$$

Equação 2-8

$$F(t)=1-P(T>t) \therefore$$

$$F(t)=P(T<t)$$

Analisando o gráfico da CDF vemos que se trata de uma função monotônica crescente.

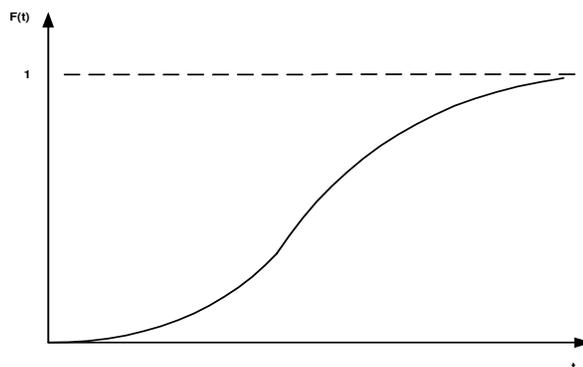


Figura 2-2 – Função de Distribuição Acumulada

2.1.3. Conceito de Disponibilidade

Segundo MODARRES (1999), disponibilidade é a probabilidade de um sistema, quando em operação nas condições definidas em projeto, estar operacional em um determinado momento.

A disponibilidade pode ser matematicamente definida de diversas formas dependendo de como são medidos o tempo operacional e o tempo fora de serviço (downtime) do sistema. Por exemplo, a disponibilidade média de um sistema pode ser interpretada como a porcentagem do tempo que o mesmo está operacional:

$$A = \frac{\textit{Tempo Operacinoal}}{\textit{Tempo Operacional} + \textit{Tempo fora do serviço}} \quad \text{Equação 2-9}$$

$$A_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad \text{Equação 2-10}$$

A_{med} – disponibilidade média;

$A(t)$ – disponibilidade no instante “t”;

Assim, a disponibilidade leva em conta tanto o tempo operacional do sistema (confiabilidade) e o tempo fora de serviço (downtime do sistema - manutenibilidade).

2.1.4. Conceito de Manutenibilidade

Manutenibilidade é a probabilidade que um sistema falho seja retornado para operação dentro de um período de tempo quando a manutenção é realizada de acordo com procedimentos estabelecidos. Manutenibilidade é uma medida downtime do equipamento, i.e., do tempo que o mesmo se encontra fora de serviço.

2.2. Diagrama de Blocos

Segundo MOURA (2006) a aplicação de técnicas da Engenharia de Confiabilidade proporciona redução de custos, otimização do processo produtivo, estabelecimento de intervalos mais acurados de manutenção preventiva, redução do tempo de espera em operações de *setup*, níveis mais baixos de estoques intermediários, aumento da vida útil de plantas produtivas, entre outras vantagens.

Dentre as técnicas mais comumente utilizadas para avaliar a confiabilidade de um sistema está o diagrama de blocos. Basicamente, um diagrama de blocos é utilizado para representar funcionalmente o desempenho de um sistema. Considere que um sistema seja constituído de equipamentos e subsistemas. Segundo SMITH (1993), um diagrama de blocos é uma rede descrevendo a função do sistema. Se um sistema possui mais de uma função, cada uma dessas é considerada individualmente e um diagrama de blocos distinto é estabelecido para cada uma das funções.

As diversas maneiras através das quais os n componentes de um sistema podem estar conectados para a realização de determinada função, podem ser ilustradas através de um diagrama de blocos (GUO and YANG (2007)) como pode ser visto, por exemplo, na Figura 2-3:

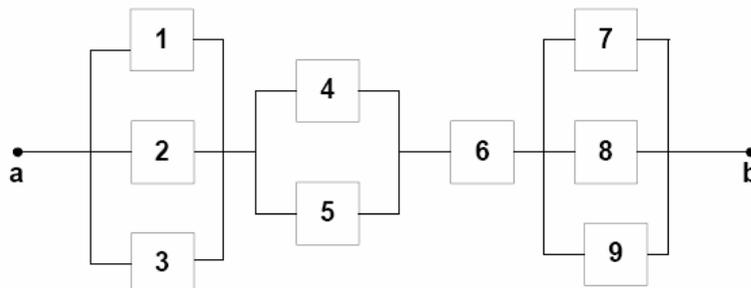


Figura 2-3 – Representação de um diagrama de blocos

Quando se tem uma conexão estabelecida entre os pontos **a** e **b**, pode-se dizer que a função do sistema representada pelo diagrama de blocos é realizada.

Entre as disposições funcionais que são mais comumente representadas através de diagramas de blocos estão os sistemas em série, em paralelo e série-paralelo (Figura 2-3).

2.2.1. Sistemas em série

A representação funcional de um sistema em série pode ser ilustrada na Figura 2-4. Basicamente, em um sistema em série para que o sistema desempenhe sua função todos os n componentes devem funcionar. De modo contrário, o sistema falha se pelo menos um dos componentes falha.



Figura 2-4 – Diagrama de blocos em série

A confiabilidade de um sistema em série é dada em BURGAZZI and PIERINI (2007) como segue:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t), \quad \text{Equação 2-11}$$

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

2.2.2. Sistemas em paralelo

Um sistema está disposto em paralelo quando pelo menos um dos componentes é necessário para o sistema funcione. De forma contrária, para que a falha do sistema ocorra, é necessário que todos os componentes do sistema tornem-se falhos. O diagrama de blocos de um sistema em paralelo é mostrado na Figura 2-5:

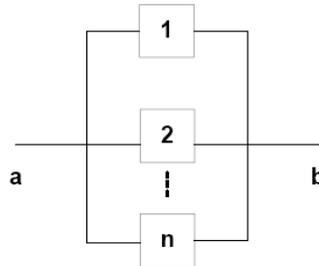


Figura 2-5 – Diagrama de blocos em paralelo

A confiabilidade de um sistema em paralelo é dada em BURGAZZI and PIERINI (2007) como segue:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)], \quad \text{Equação 2-12}$$

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

2.2.3. Sistemas em série-paralelo

A confiabilidade de um sistema série-paralelo é determinada a partir das confiabilidades de seus subsistemas a depender se o mesmo está em série ou paralelo. Um sistema série-paralelo pode ser ilustrado na Figura 2-6. Desta forma, a confiabilidade de um sistema série-paralelo é calculada a partir da Equação 2-11 e Equação 2-12.

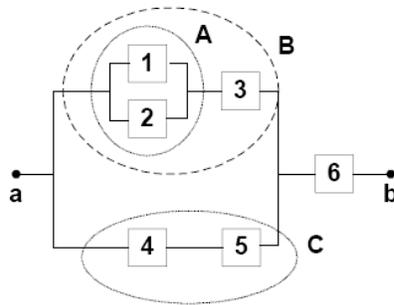


Figura 2-6 – Diagrama de blocos em série-paralelo

2.3. Processos Estocásticos

Um processo estocástico $\{X(t), t \in T\}$ é uma família de variáveis aleatórias, i.e., para cada $t \in T$, $X(t)$ é uma variável aleatória. No contexto de confiabilidade, t é interpretado como o tempo e o resultado, $X(t)$ representa o estado do processo no instante t , segundo ROSS (2000).

O conjunto T é denominado de conjunto índice do processo. Quando T é um conjunto contável, então o processo estocástico é dito ser um processo de tempo discreto. Se, por outro lado, T é um intervalo do conjunto real, então o processo estocástico é dito ser um processo de tempo contínuo. Assim, $\{X_n(t), n = 0, 1, 2, \dots\}$ é um processo de tempo discreto indexado por inteiros não-negativos, enquanto que $\{X(t), t \geq 0\}$ é um processo de tempo contínuo indexado por números reais não negativos.

Outro conceito relevante diz respeito com o espaço de estados de um processo estocástico o qual é definido como um conjunto de todos os possíveis valores que as variáveis aleatórias ($X(t)$) podem assumir.

Portanto, podemos dizer que um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias que descrevem a evolução no tempo de algum processo (físico, químico, biológico, etc.).

2.3.1. Processo de Poisson Homogêneo (HPP)

De acordo com ROSS (2000) Populações homogenias são aquelas que os membros são identificados com respeito a uma determinada característica de interesse. Um exemplo seria se todos os dados de uma população de equipamentos tiverem a mesma taxa de falha, então a população é considerada homogenia com relação a taxa de falha.

Segundo MODARRES (1999), um HPP com “taxa de ocorrência de falha” (Rate of Occurrence of Failures “ROCOF”) igual a λ deve satisfazer as características:

1. O número de falhas observadas em intervalos de tempo não sobrepostos é independente.
2. O numero de falhas observadas em um intervalo de comprimento “t” segue uma distribuição de Poisson com média igual a λt .
3. $\lambda(t) = \lambda$ (constante).
4. A probabilidade de ocorrer mais de uma chegada em um intervalo t, t + Δt é desprezível. (com Δt suficientemente pequeno).

2.3.2. Processo de Poisson Não – Homogêneo (NHPP)

Dados provenientes de sistemas submetidos a diferentes condições operacionais e ambientais, com diferenças de projeto e nos processos produtivos, apresentam diferentes características de confiabilidade. Eles podem apresentar distintos modos de falha, taxas de reparo e taxas de falha. Nesses casos, não é realístico assumir que todos os itens de uma população composta de diferentes amostras possuam as mesmas características de confiabilidade. Tem-se uma variabilidade intrínseca da característica de confiabilidade entre as amostras. Diz-se que a população é não-homogênea.

MODARRES (1999) Descreve que no NHPP as propriedades são:

1. A ROCOF (taxa de ocorrência de falha) λ não é constante.
2. A probabilidade de ocorrer exatamente “n” falhas em um intervalo [t, t + Δt] é dada por uma distribuição de Poisson de média igual a:

$$\int_t^{t+\Delta t} \lambda(t) dt$$

Equação 2-13

2.3.3. A Distribuição Weibull e o Processo Power Law

É importante a análise da distribuição de probabilidades Weibull devido à sua larga aplicação na modelagem da distribuição de tempos entre falhas. Ela está relacionada ao processo Power Law, um modelo comumente utilizado para sistemas reparáveis cujas taxas de falha não são constantes ao longo do tempo RIGDON (2000).

A distribuição Weibull tem como função confiabilidade:

$$S(x) = \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right], \quad x > 0$$

Equação 2-14

Com a equação da sua CDF (cumulative distribution function) representada por:

$$F(x) = 1 - S(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right], \quad x > 0 \quad \text{Equação 2-15}$$

Sua PDF (probability density function) por:

$$f(x) = F'(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right], \quad x > 0 \quad \text{Equação 2-16}$$

E sua função mortalidade é:

$$h(x) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1}, \quad x > 0 \quad \text{Equação 2-17}$$

O processo Power Law é um processo NHPP cuja função intensidade ($\lambda(t)$, ou ROCOF) tem a mesma forma da função mortalidade da distribuição Weibull, com o tempo t no lugar da variável x RIGDON (2000):

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad \text{Equação 2-18}$$

O parâmetro β afeta a forma como o sistema se deteriora se mantém constante ou melhora com o tempo, por isso é chamado parâmetro de forma. Se $\beta < 1$, $\lambda(t)$ decresce com o tempo, o que reflete uma melhoria do sistema, e os tempos entre falhas se tornam cada vez maiores. Se $\beta > 1$, $\lambda(t)$ está crescendo ao longo do tempo, representando uma deterioração progressiva do sistema e falhas ocorrendo cada vez com mais frequência. Porém, se $\beta = 1$, a função $\lambda(t)$ se reduz à constante $1/\alpha$, e o processo Power Law se transforma então num Processo Homogêneo de Poisson. O parâmetro α é denominado parâmetro de escala. Devido à sua capacidade de modelar taxas crescentes, constantes, ou decrescentes, o processo de Pow Law tem grande aplicabilidade em modelagem de taxas de falha,.

Os parâmetros β e α podem ser encontrados a partir de estimadores de máxima verossimilhança. Segundo RIGDON (2000), os estimadores de máxima verossimilhança para tais parâmetros no caso de dados censurados por tempo são:

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \log\left(\frac{t}{t_i}\right)} \quad \text{Equação 2-19}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{t}{N^{1/\hat{\beta}}}$$

Equação 2-20

O estimador $\hat{\beta}$ é viciado. O estimador não viciado utilizado para β é:

$$\bar{\beta} = \frac{N-1}{N} \hat{\beta} = \frac{N-1}{\sum_{i=1}^N \log\left(\frac{t}{t_i}\right)}$$

Equação 2-21

Onde N é o número total de falhas, t é o tempo total pré-definido para o teste e t_i é o tempo acumulado no momento da ocorrência da i -ésima falha.

2.3.4. Testes de Tendência

Os testes de hipóteses são usados com a finalidade de definir qual modelo segue a amostra estudada. A definição das hipóteses a serem usadas depende do tipo de informação que se quer extrair dos dados, como por exemplo, querer testar se os dados seguem os modelos HPP ou NHPP. A proposição das hipóteses é feita em cima dos dois modelos, ou seja, pode-se querer testar se a base de dados rejeita ou não um modelo HPP (sendo esta a hipótese inicial, também chamada de hipótese nula), sendo a resposta negativa, conclui-se que há evidências o suficiente para a rejeição da hipótese nula em favor da hipótese contrária ou alternativa. Nesse trabalho, para testar estas hipóteses, são utilizados os testes de tendência, no caso, o teste de Laplace e o teste MIL-HDBK-189, conforme CROWDER (1991).

2.3.4.1. Teste de Laplace

O teste de Laplace, baseado numa estatística amostral, permite testar se a taxa de avarias é constante ou se, pelo contrário, apresenta tendência.

Este teste também é usado para testar a presença de um Processo de Poisson não homogêneo (taxa de falhas variável do tempo).

Segundo MODARRES (1999), o teste de Laplace, também chamado algumas vezes de teste do centróide, testa a hipótese nula $H_0 : \beta=0$ em contraposição a hipótese não nula $H_1: \beta \neq 0$.

Quando $\beta = 0$ o função densidade de probabilidade condicional se torna uma distribuição uniforme entre $[0,T]$. E $S = \sum T_i$ tem a distribuição da soma das “n” independentes e uniformemente distribuídas variáveis aleatórias então podemos usar a estatística U que tem aproximadamente a distribuição normal padrão como segue em LEWIS (1987).

Ou seja, a hipótese nula, é a hipótese de se tender para um Processo de Poisson homogêneo, será rejeitada se $|U|$ for superior ao valor crítico para um determinado nível de significância. A rejeição da hipótese nula mostra a que o sistema se comporta como um Processo de Poisson Não Homogêneo (NHPP). A estatística do teste é representada pela equação abaixo, conforme CROWDER (1991):

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} - \frac{t_0}{2} \frac{1}{t_0 \sqrt{12n}}$$

Equação 2-22

Onde:

T_i 's- os tempos acumulados de ocorrência de falha.

N – numero de ocorrências.

U - é a estatística do teste de Laplace

Se a hipótese $H_1: \beta \neq 0$, então os grandes valores para o módulo de U indicam uma evidência contrária à hipótese nula, mas se a hipótese $H_1: \beta <, > 0$ então o maior valor do $|U|$ fornece uma evidência contrária à hipótese nula. Em outras palavras, se $|U|$ assume valores “próximos” de 0, não existe uma evidência de tendência nos dados, então diz-se que o processo é estacionário (HPP).

Se $U < 0$ existe uma tendência de redução no “tamanho” dos intervalos entre sucessivas falhas ou se $U > 0$ e existe uma tendência de aumento no “tamanho” dos intervalos entre sucessivas falhas, então o processo não é estacionário (NHPP).

2.3.4.2. Teste MIL-HDBK-189

Diferentemente do teste de Laplace, o teste MIL-HDBK-189 segue uma distribuição qui-quadrada com “ $2n$ ” graus de liberdade, que pode ser representada pela equação abaixo, como temos em CROWDER (1991):

$$V = 2 \sum_{i=1}^n \log\left(\frac{t_0}{t_i}\right)$$

Equação 2-23

Quando se fala em tempo entre falhas, o “ n ” se torna “ $n-1$ ”, e substitui-se t_0 por t_n e V segue uma distribuição qui-quadrado com “ $2(n-1)$ ” graus de liberdade. Assim como no teste de Laplace, as considerações das hipóteses são as mesmas.

2.3.5. Testes de Aderência

Os testes de aderência testam hipóteses com o objetivo de saber se os dados em estudo aderem a certa distribuição de acordo com qual distribuição se quer testar.

2.3.5.1. Teste de Cramér Von Mises e Estimação de Curvas

Nem todos os equipamentos ao fim da análise puderam ser modelados por um Processo Homogêneo de Poisson, levando-os conseqüentemente a serem modelados por um Processo Não-Homogêneo de Poisson. Sendo assim, a taxa de falhas existente não é mais constante e sim dependente do tempo e deve ser estimada de alguma forma. O teste de Cramér Von Mises analisa se a ROCOF (Rate of Occurrence Of Failure) de determinada base de dados pode se adequar a um processo Power Law. Segundo RIGDON (2000), a comparação da estatística encontrada no teste é feita com valores tabelados para a confirmação da rejeição ou não-rejeição da hipótese nula. A estatística do teste de Cramér Von Mises é dada a seguir:

$$C_R^2 = \frac{1}{12n} + \sum (\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2n})^2 \quad \text{Equação 2-24}$$

Onde o valor de \hat{R}_i é obtido da seguinte forma:

$$\hat{R}_i = \left(\frac{t_i}{t} \right)^{\bar{\beta}} \quad \text{Equação 2-25}$$

Como se vê, \hat{R}_i depende também do cálculo de um outro valor, o parâmetro $\bar{\beta}$, deve-se estimar o valor deste parâmetro também para o uso dele na estimação de \hat{R}_i . Logo, a equação abaixo:

$$\bar{\beta} = \frac{n-2}{\sum_{i=1}^{n-1} \log(t_n / t_i)} \quad \text{Equação 2-26}$$

fornece o valor desejado para tal parâmetro.

Mas nos casos em que os dados rejeitarem o processo Power Law como modelo para sua ROCOF, estimar curvas as quais os dados possivelmente se ajustem, torna-se uma ótima ferramenta para modelagem da taxa de ocorrência de falha. Já que temos que a ROCOF é igual à primeira derivada do número esperado de falhas, podemos representá-la matematicamente da seguinte forma:

$$v(t) = \frac{d}{dt} \{E[N(t)]\} \quad \text{Equação 2-27}$$

Enfim, para se definir a qual curva de distribuição os dados melhor se adequou usa-se por referência o valor da estatística R^2 , onde o maior destes valores indica a qual curva de distribuição os dados melhor se ajustam.

2.3.5.2. Teste de Kolmogorov-Smirnov

O teste de Kolmogorov-Smirnov é uma prova de aderência que mede o grau de concordância entre a distribuição de um conjunto de valores amostrais e uma determinada distribuição teórica. O teste determina se os valores da amostra podem razoavelmente ser considerados como provenientes de uma população com aquela distribuição.

A partir dos dados, estimam-se os parâmetros da distribuição desejada e o “p-valor” é calculado para avaliar a rejeição ou não dos dados à distribuição desejada. Segundo BARBETTA (2004), “p-valor, ou probabilidade de significância, é a probabilidade da estatística do teste em questão acusar um resultado tão ou mais distante do esperado (para distribuições de referência simétrica e de testes bilaterais. Em outros casos, essa distância seria em apenas uma direção), como o resultado na amostra particular observada, supondo como a hipótese verdadeira”. O cálculo do p-valor auxilia de acordo com sua análise em relação ao nível de significância desejado, ou seja, o p-valor que se encontrar mais distante do nível de significância será considerado o mais relevante na aceitação do teste. Ainda em relação ao p-valor, existe a possibilidade de a estatística do teste desejado indicar um caminho enquanto que seu p-valor pode indicar outro. Nesse caso, leva-se em consideração a indicação do p-valor.

2.4. Técnicas de simulação

2.4.1. Geração de variáveis aleatórias

Os números pseudo-aleatórios são utilizados para gerar as variações aleatórias ou variáveis aleatórias. Assim, se ni é um número pseudo-aleatório, e é usado para gerar uma variável X , então X é chamado de variação aleatória. A seqüência X pode ser uniformemente distribuída ou não uniformemente distribuída.

As variáveis aleatórias de uma dada distribuição de probabilidade serão as entradas para modelos de simulação, e são geradas usando um conjunto de números aleatórios uniformemente distribuídos.

A geração dessas variáveis pode ser feita de várias maneiras, porém os mais comuns são o método da transformação inversa e o método da rejeição, e a seguir discutiremos alguns desses métodos.

2.4.2. Método da inversão

Este método usa a função de probabilidade acumulada $F(X)$, que sabemos variar de 0 a 1, combinada com os números pseudo-aleatórios que também são gerados no intervalo de 0 a 1. Assim, podemos gerar variáveis aleatórias X , colocando $n_i = F(X)$ e resolvendo esta equação para X (achando a inversa).

2.4.2.1. Inversa da Distribuição exponencial

A função densidade de probabilidade para a função exponencial é dada por:

$$f(X) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda X} & \text{para } \lambda > 0 \text{ e } X > 0 \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases} \quad \text{Equação 2-28}$$

Para essa distribuição, $E(X) = \text{média} = 1 / \lambda$

A função de probabilidade acumulada é obtida pela integral

$$F(X) = \int_0^X \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{Equação 2-29}$$

Assim igualando a n_i (números aleatórios) tem-se:

$$n = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{com } 0 \leq n < 1 \quad \text{Equação 2-30}$$

Aplicando logaritmo natural em ambos os membros tem-se

$$X_i = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - n_i) \quad \text{ou} \quad X_i = -\frac{1}{\lambda} \ln(n_i) \quad \text{Equação 2-31}$$

A sequência dada por $X_i = -(1/\lambda) \ln n_i$ também terá a mesma distribuição que a gerada por $(1-n_i)$ e será positiva.

2.4.2.2. Inversa da Distribuição Weibull

A função densidade de probabilidade para a função Weibull é dada por:

$$f(x) = F'(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right], \quad x > 0 \quad \text{Equação 2-32}$$

A função de probabilidade acumulada é obtida pela integral de F(x):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} 1 - S(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right], \quad x > 0 \quad \text{Equação 2-33}$$

Assim, igualando a acumulada a n_i (números aleatórios) e aplicando logaritmo natural em ambos os membros tem-se;

$$n_i = \exp\left\{-\left(\frac{x_i}{\alpha}\right)^\beta\right\} \therefore$$

$$\ln(n_i) = -\left(\frac{x_i}{\alpha}\right)^\beta \therefore$$

$$-\left(\frac{x_i}{\alpha}\right) = \ln(n_i)^{\frac{1}{\beta}} \therefore$$

$$x_i = -\frac{\alpha \ln(n_i)}{\beta} \quad \text{Equação 2-34}$$

2.5. Algoritmos Genéticos

Segundo MICHALEWICZ (1996), os algoritmos genéticos (AG) são técnicas poderosas de otimização inspiradas pelos princípios da seleção natural da espécie. Devido a sua ampla aplicabilidade, AG vem sendo usado com sucesso a uma larga escala de áreas de problemas complexos de otimização: engenharias, bioquímica, pesquisa operacional, computação.

Geralmente, modelar um problema de otimização por um AG consiste em duas etapas:

- Definir um genótipo, o qual é a estrutura de dados que codifica um candidato da solução do problema;
- Fornecer uma função objetiva que avalia um candidato à solução.

Inspirado pelas réguas da seleção natural, a linguagem adotada contém muitos termos da biologia, que necessitam de redefinição apropriadamente para caber no contexto algorítmico. Assim, quando se diz que os AGs operam sobre um jogo de cromossomos ou de indivíduos (artificiais), estes devem ser compreendidos como *Strings* numéricos, que podem ser seqüenciados por dígitos binários 0 e 1 ou valores reais, segundo MARSEGUERRA M. (2006).

A teoria se baseia inicialmente na geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções para um problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada e para cada indivíduo é dado um índice, refletindo sua habilidade de adaptação a um determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Os indivíduos selecionados sofrem modificações em suas características fundamentais através de mutações e cruzamentos genéticos, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que um conjunto de soluções satisfatórias seja encontrado, como utilizado por BEASLEY (1993).

Para GOLDBERG (1989), o primeiro passo para a aplicação de AGs a um problema real é a codificação das variáveis do problema. Cada variável é discretizada em um determinado intervalo e representada com um conjunto de bits, sendo que o conjunto de variáveis codificado é chamado de "cromossomo". Um ou mais cromossomos associados para formar um "indivíduo". Em seguida, um grupo de indivíduos é criado formando uma "população". Esta população inicial pode ser aleatória, ou formada com base em conhecimento prévio sobre a natureza do problema. A existência de uma população de prováveis soluções caracteriza a exploração paralela do espaço de busca. Esta é uma vantagem de AGs em relação a métodos convencionais que normalmente exploram uma possível solução de cada vez, como temos em MITCHELL (1996).

Cada indivíduo da população pode ser visto como uma possível solução para um problema. Para discriminar os indivíduos mais aptos, faz-se necessário desenvolver uma medida de qualidade dos indivíduos. Tal medida de adequação, em relação à solução para o problema, é conhecida como *fitness*. Temos em GOLDBERG (1989) que o cálculo é um ponto crítico para o algoritmo, já que, em última análise, é a função de *fitness* que está sendo otimizada.

Os indivíduos são selecionados a partir do *fitness*, por métodos probabilísticos de modo a poderem gerar descendentes, implementando, assim o mecanismo da sobrevivência do

mais apto. Essa sistemática tem uma analogia ao processo de seleção natural que guia a evolução das espécies, LAPA et al. (2000).

A partir daí, os membros selecionados podem sofrer modificações em suas características fundamentais através de mutações e cruzamentos genéticos (crossover), submetidos a modificações probabilísticas através de operadores genéticos. O cruzamento genético analisa dois indivíduos e combina partes de ambos para formar dois novos descendentes. A mutação, por outro lado, atua em um indivíduo em particular, muda aleatoriamente um bit de sua composição. O *crossover* atua como busca local, enquanto que a mutação realiza uma busca global do espaço de busca.

Para GOLDBERG (1989), a consequência da seleção e da modificação pelos operadores genéticos, cria uma nova geração de indivíduos e que substitui a anterior. A nova população é submetida à avaliação e posterior seleção e modificação. Este processo é repetido iterativamente, esperando-se que a cada geração a qualidade média dos indivíduos aumente. Ao longo de um determinado número de gerações é possível que soluções muito boas para o problema sejam geradas, ou mesmo que a solução ótima seja encontrada.

2.5.1. Codificação

Segundo BACK (1996), tradicionalmente, as variáveis de decisão da otimização do problema são representadas em AGs usando Strings binários. Na codificação binária os elementos do cromossomo pertencem ao conjunto $\{0,1\}$. O alfabeto adotado apresenta, portanto, a menor cardinalidade possível, uma vez que com apenas um símbolo a codificação seria impossível.

Alguns autores tem implementado outras alternativas, como codificação com valores reais ZITZLER (1999.). Estes estudos concluíram que o método de codificação utilizado para seleção dos cromossomos depende das características do problema e que não existe resultado que conduza uma melhor solução utilizando codificação binária ou real.

2.5.2. Inicialização

Segundo HUE (1997), para ocorrer a inicialização em AG, deve-se considerar o tamanho da população e o método de inicialização adotado no problema.

Na inicialização, a discussão envolve o conceito de diversidade. A diversidade promove que boa parte do espaço de busca esteja representada na população. O ideal seria que a população inicial fosse tal que todos os possíveis alelos de cada gene estivessem representados. Isso porque quanto maior o tamanho da população, mais fácil se torna viável

essa possibilidade. Porém, o aumento do tamanho da população tem nitidamente um custo computacional associado, tanto em memória quanto em desempenho (HARIK G. (1999)).

De maneira geral, estratégias são adotadas na inicialização de forma a maximizar a diversidade da população inicial. Uma técnica muito utilizada é inicializar uma população de n indivíduos gerada aleatoriamente. Na representação binária, por exemplo, pode-se sortear cada bit do cromossomo com probabilidade uniforme para cada valor, o que possibilita que uma grande porção do gene esteja representada.

2.5.3. Seleção

O processo de seleção corresponde a escolha probabilística de cromossomos de uma população tendo como base as suas aptidões. Quanto maior for a aptidão de um indivíduo, maior será a chance de ele ser selecionado. Os métodos de seleção são projetados para escolher preferencialmente indivíduos com maiores notas de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população. Um método de seleção muito utilizado é o Método da Roleta, onde indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta. Neste método, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, aos indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto aos de aptidão mais baixa é dada uma porção relativamente menor da roleta. Finalmente, a roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos, como indivíduos que participarão da próxima geração, aqueles sorteados na roleta. A Figura 2-7 ilustra uma distribuição hipotética de aptidões em uma população.

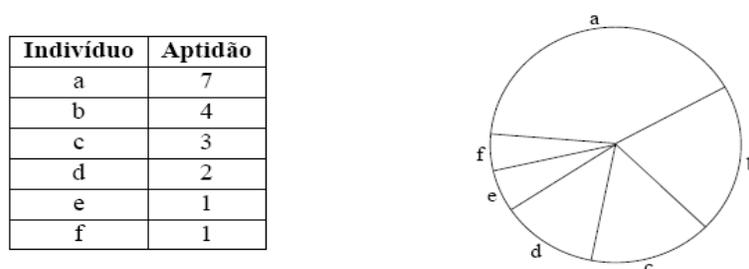


Figura 2-7 - Seleção por roleta

Uma observação a respeito desse tipo de seleção se refere a existência de *super-indivíduos*, onde a aptidão desses candidatos é muito superior aos dos demais, dominando a população no momento da seleção. Esses *super-indivíduos* podem não representar uma solução ótima, o que caracterizaria uma convergência prematura. Na Figura 2-7, por exemplo,

os indivíduos a e b contariam, juntos, com uma probabilidade de serem escolhidos maior do que a de todos os outros somadas.

Existem ainda outras propostas de seleção. Uma delas é a seleção por torneio, onde um sub-conjunto de indivíduos da população é sorteado e os melhores entre eles são selecionados. Esse tipo de seleção é particularmente adequado a algumas aplicações em que a análise da qualidade de um indivíduo depende dos demais. Um exemplo disso seria a evolução de estratégias para se jogar um determinado jogo, como o xadrez.

2.5.4. Crossover

O crossover combina o material genético de dois cromossomos selecionados anteriormente através do método de cadeia binário, utilizada no GA clássico (HOLLAND (1975)), no qual são formadas duas cadeias $x = x_1x_2\dots x_l$ e $y = y_1y_2\dots y_l$ de comprimento l , que são selecionadas com probabilidade de crossover p_c .

Um número r pertencente a $\{1,2,\dots,l-1\}$ indicando o ponto de cruzamento (crossover) é selecionado. Duas novas cadeias são formadas a partir de x e y através da troca de um conjunto de atributos à direita da posição r , resultando em $x' = x_1\dots xiry_{i+1}\dots y_l$ e $y' = y_1\dots yirx_{i+1}\dots x_l$. Os dois novos cromossomos gerados x' e y' são os filhos (offspring) de x e y .

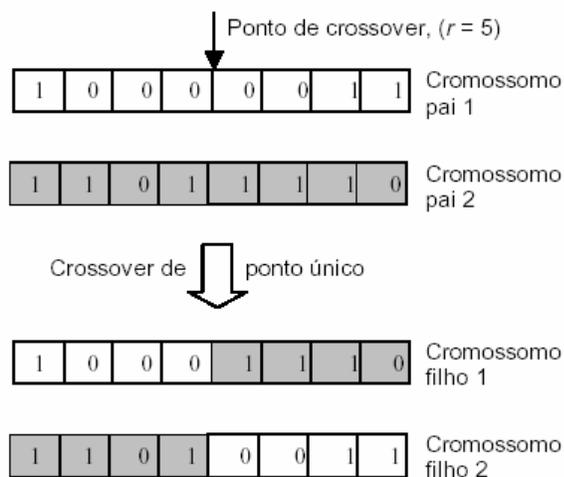


Figura 2-8 Crossover de um único ponto para cadeias de comprimento $l = 8$.

2.5.5. Mutação

A operação de mutação é utilizada para garantir uma maior busca do espaço de estados e evitar que o algoritmo genético convirja muito cedo para mínimos locais. A mutação é

efetuada alterando-se o valor de um gene de um indivíduo sorteado aleatoriamente com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação, ou seja, vários indivíduos da nova população podem ter um de seus genes alterado aleatoriamente.

2.5.6. Apresentação do algoritmo genético

O algoritmo apresentado a seguir mostra a funcionalidade de um método que busca a otimização de um problema de função objetiva simples.

Inicialmente, o usuário determina uma população de tamanho N , a qual é formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções para um problema. Os candidatos selecionados são avaliados e para cada indivíduo é dado um índice, refletindo sua habilidade de adaptação a um determinado ambiente. O processo de avaliação é chamado de fitness. Se existir a violação de alguma restrição proposta para o problema, os candidatos são penalizados e classificados de acordo com o seu novo fitness. Se a solução do problema for encontrada a partir da população atual denotada de N (ver Figura 2-9), então o algoritmo é finalizado devido ao alcance do objetivo. Caso isso não ocorra, haverá uma seleção que segue o critério de elitismo, ou seja, os melhores indivíduos, com melhores valores de fitness, serão priorizados na geração de uma nova população de candidatos viáveis para a solução do problema. Os indivíduos selecionados sofrem modificações em suas características fundamentais através de cruzamentos genéticos (crossover) e mutações, gerando descendentes para a próxima geração.

Após a mutação essa nova população funde-se com a população de indivíduos viáveis da população anterior, formulando uma nova população de tamanho $N_f + N$, de tamanho maior do que a anterior, de forma a passar agora pelos mesmos critérios anteriormente realizados de classificação. Deste ponto, tem-se que existe uma Reposição de uma nova população com os indivíduos mais viáveis da população $N_f + N$ retornando ao tamanho da população inicial N . Se essa nova população corresponder às expectativas de solução do problema, então a finalização é feita com a apresentação do indivíduo mais viável. Do contrário, caso não ocorra o encontro do indivíduo viável, o processo se repete até a solução do problema ser encontrada ou ocorrer a satisfação de um critério de parada do algoritmo.

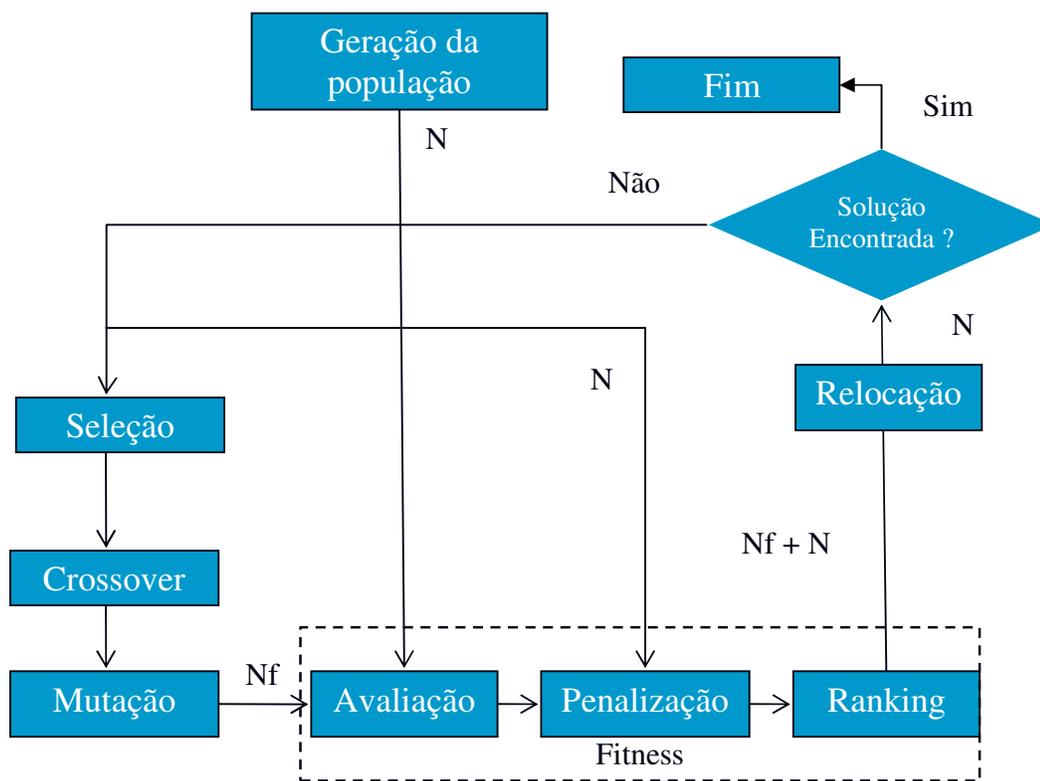


Figura 2-9: Fluxograma do método do Algoritmo Genético

2.5.7. Algoritmos Genéticos para Otimização da Confiabilidade e Custo de manutenção

Cada vez mais tem se tornado importante tratar da manutenção preventiva de equipamentos de uma forma prioritária, visto que as conseqüências de tal trato são reconhecidas em índices de confiabilidade e redução de custo. Visto isso, um estudo para se obter uma política de manutenção preventiva ótima é necessário, e a análise tanto para a função confiabilidade como para a função de custo de manutenção, partindo de uma visão de componente a sistema, é diretamente envolvido em um modelo apresentado por Lapa (2005) e é disposto a seguir.

2.5.7.1. Modelo de Confiabilidade para um equipamento que possui uma política de manutenção programada

A confiabilidade de um equipamento pode ser definida como a probabilidade do mesmo está em operação até a primeira e única falha sob condições operacionais específicas. Em

equipamentos não reparáveis, a ocorrência dessa falha implica que o equipamento seja completamente substituído por um novo em seu lugar. Neste caso se é desejado obter a medida da confiabilidade para o equipamento após o instante da primeira falha, o comportamento observado será exatamente o mesmo da primeira medida de confiabilidade para o mesmo intervalo de tempo.

Entretanto, quando o equipamento é submetido a uma seqüência de manutenções programadas, a confiabilidade passa agora a ser afetada de forma que existe a preocupação de se conhecer o valor da confiabilidade em cada intervalo de tempo entre as intervenções de manutenção. Logo, a confiabilidade é apresentada como segue abaixo:

$$R(t, T_m(i), T_m(ult)) = R[t - T_m(ult)] \prod_{i=1}^{ult} R[T_m(i) - T_m(i-1)], \quad T_m(ult) \leq t \leq T_{mis} \quad \text{Equação 2-35}$$

Onde T_m é a data de programação da i th intervenção de manutenção do componente m . $T(ult)$ será a data da última intervenção realizada até o tempo t . Logo, ult será exatamente o números de intervenções realizadas até o tempo t .

O objetivo aqui é saber qual o impacto que intervenções seqüenciais têm sobre a confiabilidade. Dessa forma, é conveniente estabelecer um parâmetro p que permita que a qualidade de uma intervenção seja explicitamente levada em consideração para se avaliar a confiabilidade de um equipamento.

Esse argumento, por sua vez, representa a probabilidade que a intervenção seja realizada de maneira satisfatória, i.e., probabilidade de retornar o equipamento falho a uma condição de desempenho que o mesmo tinha exatamente quando foi posto a funcionar pela primeira vez.

$$R_m[t, T_m(i), T_m(ult)] = \begin{cases} R(t, T_m(i), T_m(ult)) = R[t - T_m(ult)] \prod_{i=1}^{ult} R[T_m(i) - T_m(i-1)], & T_m(ult) \leq t \leq T_{mis} \\ 0, & T_m(i) \leq t \leq T_m(i) + \Delta_m(i) \end{cases} \quad \text{Equação 2-36}$$

A partir da Equação 2-36, a qual fornece a confiabilidade de um equipamento de acordo com o número de intervenções, é possível obter alguma indicação se as intervenções de manutenção provocaram alguma mudança na confiabilidade. Este impacto pode ser avaliado comparando-se a relação entre a confiabilidade do equipamento com $(R_m[t, T_m(i), T_m(ult)])$ e sem $(R(t))$ intervenções, considerando que é esperado uma melhoria da confiabilidade, onde a equação a seguir leva em consideração que o equipamento segue uma distribuição Weibull:

$$\frac{R_m[t, T_m(i), T_m(ult)]}{R(t)} = \frac{\exp[-(t - T_m(ult))/\theta_j]^{m_j} + [-p(ult)] + \sum_{i=1}^{ult} [-(T_m(i) - T_m(i-1))/\theta_j]^{m_j}}{\exp[-(t/\theta_j)^{m_j}]} \quad \text{Equação 2-37}$$

A razão mostrada na Equação 2-37 deve ser > 1 para que a manutenção influencie de forma satisfatória na função da confiabilidade do equipamento. Essa restrição é apresentada como segue na equação abaixo:

$$\frac{R_m[T_m(ult)]}{R[T_m(ult)]} = \exp\left[-[p(ult)] + [T_m(ult)/\theta_j]^{m_j} + \sum_{i=1}^{ult} [-(T_m(i) - T_m(i-1))/\theta_j]^{m_j}\right] > 1 \quad \text{Equação 2-38}$$

Visto que o modelo de confiabilidade apresentado até agora deve ser considerado apenas para um equipamento, a modelagem da confiabilidade do sistema para m componentes pode ser direcionada de acordo com diversas ferramentas, tais como cadeias de Markov, diagrama de blocos, entre outros.

2.5.7.2. Modelo de Custo

A partir do modelo de confiabilidade descrito até o momento e levando em consideração os intervalos entre intervenções, o modelo de custo pode ser então modelado. Suponha que o custo total por intervenção seja denotado por C_T , onde esse custo é composto pelo custo de manutenção preventiva C_m e manutenção corretiva C_r . Sendo assim, o custo total para a primeira intervenção é calculado da seguinte forma:

$$C_T^{0 \rightarrow 1} = C_m^{0 \rightarrow 1} R[T_m(1)] + C_r^{0 \rightarrow 1} \{1 - R[T_m(1)]\} \quad \text{Equação 2-39}$$

onde o indicador \rightarrow representa a ocorrência de uma transição.

Sendo assim, percebe-se que o custo de manutenção preventiva é afetado diretamente pela confiabilidade do equipamento até o tempo de intervenção. Enquanto que o custo de manutenção corretiva é afetado pela probabilidade de falha até o instante da intervenção.

A partir da segunda intervenção, é levado em consideração o fato de que a confiabilidade do componente é avaliada observando-se que (de forma que) até o primeiro momento não se teve intervenção, ou seja, assume-se que o componente agora é afetado de forma a ele não ter falhado até o tempo da primeira intervenção, obtendo-se assim uma confiabilidade condicional. O custo de reparo conseqüentemente é afetado pelo complementar dessa confiabilidade condicional, fornecendo a seguinte equação:

$$C_T^{1 \rightarrow 2} = C_m^{1 \rightarrow 2} \left\{ \frac{R[T_m(2)]}{R[T_m(1)]} \right\} + C_r^{0 \rightarrow 1} \left\{ 1 - \left\{ \frac{R[T_m(2)]}{R[T_m(1)]} \right\} \right\} \quad \text{Equação 2-40}$$

Sendo assim, a equação do custo total pode ser denotada como a seguir:

$$C_T^{0 \rightarrow T_{mis}} = \sum_{j=1}^{ult} C_m^{(j-1) \rightarrow j} \{R[T_m(j)] / R[T_m(j-1)]\} + C_r^{(j-1) \rightarrow j} \{1 - \{R[T_m(j)] / R[T_m(j-1)]\}\} + C_r^{ult \rightarrow T_{mis}} \{1 - \{R[T_{mis}] / R[T_m(ult)]\}\} \quad \text{Equação 2-41}$$

É importante observar que a terceira parcela do lado direito da igualdade não pertence ao somatório, pois a mesma corresponde ao intervalo entre o tempo de missão e a última intervenção feita.

O custo apresentado é o custo total esperado para um componente apenas. No caso de existir dois ou mais componentes, o custo total esperado agora é avaliado como o somatório dos custos totais esperados por componente, resultando na equação a seguir:

$$\begin{aligned}
 C_{T_{sis}}^{0 \rightarrow T_{mis}} &= \sum_{Q=1}^X C_T^{0 \rightarrow T_{mis}} \\
 &= \sum_{Q=1}^X \sum_{j=1}^{ult} C_{mQ}^{(j-1) \rightarrow j} \{R_Q[T_{mQ}(j)]/R_Q[T_{mQ}(j-1)]\} + C_{rQ}^{(j-1) \rightarrow j} \{1 - \{R_Q[T_{mQ}(j)]/R_Q[T_{mQ}(j-1)]\}\} \\
 &\quad + C_{rQ}^{ult \rightarrow T_{mis}} \{1 - \{R_Q[T_{mis}]/R_Q[T_{mQ}(ult)]\}\}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 2-42}$$

2.5.7.3. Função Objetivo

A função objetivo apresentada no modelo desenvolvido por LAPA et al. (2005) apresenta uma otimização simultânea da confiabilidade e do custo da seguinte maneira:

$$fit = W_d \text{Func} + W_c C_{T_{sis}}^{0 \rightarrow T_{sis}}
 \tag{Equação 2-43}$$

onde func. representa a confiabilidade média do sistema. Enquanto que o C_t representa o custo total do sistema. O fator W_d varia entre 0 a 1 e W_c são pesos determinados pelo especialista para definir uma ponderação para a confiabilidade média e para o custo.

3. MODELO PROPOSTO

Nessa seção será apresentado um modelo que visa otimizar o custo de atividade de manutenção através do uso de ferramentas como algoritmos genéticos e a análise complementar de confiabilidade.

3.1. Modelo de Confiabilidade

A confiabilidade no modelo proposto atua como ferramenta de comparação entre políticas, política com manutenção e política sem manutenção. Sendo assim, a confiabilidade é aplicada de duas maneiras: com a atuação do impacto da qualidade da manutenção e sem esse impacto, assim como mostram as equações a seguir:

$$R(t) = R_{comp}(t - t_{ult}) \cdot q^{ult} \quad \text{Equação 3-1}$$

$$R(t) = R_{comp}(t) \quad \text{Equação 3-2}$$

3.2. Modelo de Custo proposto

O modelo de custo proposto aqui leva em consideração, assim com LAPA, os custos de manutenção e reparo que somados totalizam-se no custo total do sistema. Tal custo é obtido ao se estudar a política de manutenção que fornece o menor custo de acordo com a equação abaixo:

$$C_T^{0 \rightarrow T_{mis}} = \sum_{j=1}^{ult} \{C_p^{(j-1) \rightarrow j} + C_r^{(j-1) \rightarrow j} N_{c_j}\} + C_r^{ut \rightarrow mis} N_{c_{mis}} \quad \text{Equação 3-3}$$

Onde C_p representa o custo de manutenção preventiva, C_r representa o custo de manutenção corretiva e o N_c representa o número esperado de falhas e será discutido com mais detalhes na seção seguinte.

O custo total apresentado acima é calculado por componente e o objetivo do modelo é encontrar o custo total do sistema, o que é feito como a equação abaixo determina:

$$C_{T_{sis}}^{0 \rightarrow T_{mis}} = \sum_{Q=1}^N \sum_{j=1}^{ult} \{C_{Qp}^{(j-1) \rightarrow j} + C_{Qr}^{(j-1) \rightarrow j} N_{Qc_j}\} + C_{Qr}^{ut \rightarrow mis} N_{Qc_{mis}} \quad \text{Equação 3-4}$$

3.3. Número esperado de falhas entre manutenções

Uma dos eventos que deve ser considerado nesse trabalho é em relação ao número esperado de falhas entre manutenções preventivas. Isto porque, existe uma probabilidade do equipamento falhar entre cada manutenção preventiva. Conforme visto na Equação 3-5, o custo total de manutenção é a soma entre o custo de manutenção preventiva e manutenção corretiva, sendo o custo de manutenção corretiva o produto entre o número esperado de falhas em cada intervalo de tempo e o custo de realizar manutenção para cada componente.

No primeiro passo, analisa-se o primeiro espaço de tempo antes da primeira manutenção, gerando-se um conjunto de amostras de maneira a saber se o tempo gerado é menor que o tempo da primeira manutenção, se sim, acrescenta-se um contador representando uma falha, soma-se o tempo inicial ($t = 0$) ao tempo gerado e gera-se outro tempo de manutenção para a realização de nova verificação. Logo, enquanto o acumulador dos tempos gerados for menor que a k -ésima manutenção, o contador de falhas continuará a ser acrescido. No segundo passo, terminada a análise das manutenções preventivas, a análise será feita para o tempo restante após a última manutenção preventiva até o final do tempo de missão, verificando assim se ainda há possibilidades de ocorrer manutenções corretivas. No terceiro passo, há a contabilização do número esperado de falhas para cada componente, restando para o passo quatro apenas contabilizar o número esperado de falhas para o sistema.

```
Nsis = 0;
1ºPasso: Análise do numero de falhas até a ultima manutenção preventiva

Para(i=1;i < num_comp_sist; i++)
  Faça Para (k = 1; k < num_man_prev; k++)
    Faça ck= 0;
      Para (j = 0; j < num_amostras; j++)
        Faça t = 0;
          Amostre  $\tau \sim F()$ ;
          Faça t = t +  $\tau$ ;
          Enquanto t < Tk:
            Amostre  $\tau \sim F()$ ;
            Faça t = t +  $\tau$ ;
            Se t < Tk;
              faça ck = ck + 1;
            Fim Enquanto
          Fim Para j
        Nk= ck/num_amostras;
      Fim Para k
    n = tempo_ult_man_prev;
```

2º Passo: Análise do número de falhas após a última manutenção preventiva e o tempo restante de missão;

```

Faça t = tempo_ult_man_prev;
Enquanto (t < tempo_missao)
  Faça cmis= 0;
  Para (j = 0; j < num_amostras; j++)
    Amostre  $\tau \sim F()$ ;
    Faça t = t +  $\tau$ ;
    Enquanto t < Tmis:
      Amostre  $\tau \sim F()$ ;
      Faça t = t +  $\tau$ ;
      Se t < Tmis;
        faça cmis = cmis + 1;
    Fim Enquanto
  Fim Para j
Fim Enquanto
Nk = Nk + cmis/num_amostras;
3º Passo: Contabilização do número de falhas por componente

```

NC_i=N_k;

4º Passo: Contabilização do número de falhas para o sistema

N_{sis} = N_{sis} + NC_i;

Fim Para i;

Onde:

k número de intervalos entre manutenções preventivas;

i número de amostras por intervalo entre manutenções preventivas;

c_k contador de número esperado de falhas por intervalo de manutenções preventivas;

τ tempo amostrado de acordo com a função de probabilidade acumulada ;

N_k número esperado de falhas;

NC_i número de falhas por componente;

N_{sis} número esperado do sistema;

Para o caso exponencial, o modelo gera o *tal* da seguinte maneira:

$$R(t) = qe^{-\lambda t} \therefore$$

$$T = \frac{\ln(q) - \ln(R(t))}{\lambda}$$

Equação 3-6

Já no caso da Weibull, tem-se que:

$$R(t) = qe^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \therefore$$
$$T = \frac{\alpha(\ln(q) - \ln(R(t)))}{\beta}$$

Equação 3-7

3.4. Função Objetivo proposta

De acordo com as seções apresentadas anteriores, o objetivo está em torno da minimização do custo do sistema em relação a manutenções em geral. É importante ainda assim salientar que o custo encontrado é o custo total médio, já que o que se observa é uma amostra de custos e acaba-se pela retirada do custo médio apresentada pela melhor política de manutenção. Sendo assim, a função objetivo resume-se a:

$$fit = C_{T_{sis}^0 \rightarrow T_{sis}}$$

Equação 3-8

Onde o objetivo é se minimizar o custo ao final de um tempo de missão determinado.

3.5. Algoritmos Genéticos no modelo proposto

A partir da configuração que segue o modelo apresentado nas seções anteriores deste capítulo, as configurações do algoritmo genético utilizado são apresentadas para melhor entendimento de quais etapas e como se passou pelo processo de obtenção de uma política ótima, tendo-se também a capacidade de se obter a confiabilidade e o custo ótimo.

Para determinação de configurações iniciais, houve um processo de busca no qual se testou as probabilidades de *crossover*, de mutação e o número de cortes para a realização do *crossover*, determinando-se assim a configuração de valores. Tal processo deu-se na consideração em que a busca iniciou-se de forma seqüencial com valores mínimos de probabilidade de *crossover* de 0,7 incrementada de 0,05 a cada iteração; probabilidade de mutação de 0,001 incrementada de 0,0025 e o número mínimo de cortes para *crossover* de 1 incrementada de 1 até o alcance de 20.

Esse processo resulta em 480 alternativas de parâmetros (probabilidade de *crossover*, probabilidade de mutação e número de cortes para o *crossover*), tendo a melhor alternativa obtida a probabilidade de *crossover* é igual a 0,95, a probabilidade de mutação é igual a 0,0085 e o número de cortes é igual a 7. Esses valores são encontrados quando cada uma das 480 alternativas são inseridas no método de AG e avaliadas pela função objetivo, obtendo 480

resultados “ótimos”, tendo um para cada alternativa. Dentre dos 480 resultados “ótimos”, a combinação de parâmetros escolhida, será a com o maior resultado.

Os operadores para a execução do algoritmo foram escolhidos como segue:

- Inicialização: o método de geração de números aleatórios foi o escolhido;
- Seleção: o método de geração escolhido foi o método de torneio, o qual vem fornecendo bons resultados ao laboratório Riscotec;
- Crossover: o método de crossover tradicional foi utilizado com sete cortes, conforme descrito acima;
- Mutação: o método de mutação tradicional foi utilizado, onde cada bit de cada cromossomo é gerado um número aleatório, onde o mesmo é comparado com a probabilidade de mutação. Caso esse número aleatório seja maior que a probabilidade de mutação, ocorre a mudança de bit, de 0 para 1 ou vice-versa.

Em seguida, o tempo de missão desejado para o sistema é determinado pelo usuário e transformado para uma forma binária como mostra a Figura 3-1.

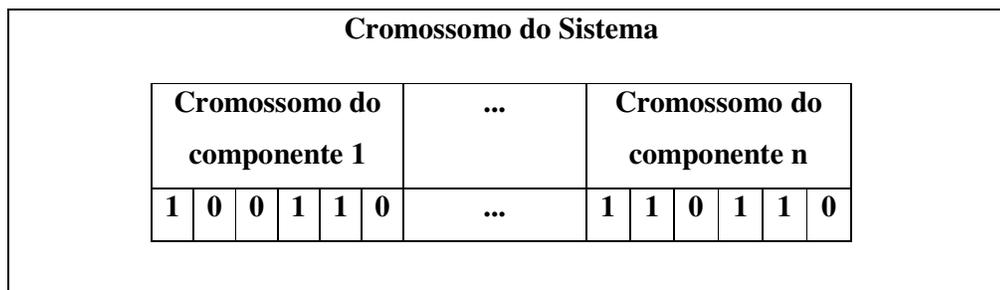


Figura 3-1 – Configuração genética do sistema para o tempo de missão t.

onde n indica o n -ésimo componente do sistema que se deseja estudar, já a numeração binária indica como cada componente se encontra naquele momento do tempo. Ou seja, o “zero” indica que o sistema sofre uma manutenção no instante limitado por Δ e o “um” indica a funcionalidade do componente sem necessidade de manutenção preventiva. A divisão de genes por cromossomo é feita a partir do intervalo de tempo que se deseja verificar o estado em que o componente se encontra, ou seja, de acordo como a Equação 3-9 informa abaixo:

$$N_{gene} = \frac{\text{Tempo de missão}}{\Delta} \tag{Equação 3-9}$$

onde N_{gene} indica o numero de genes por componente que é justamente determinado pela divisão citada acima, enquanto que para o sistema, basta calcular o produto entre o N_{gene} e o

número de componentes do sistema. *Tempo de missão* é o tempo no qual o sistema deseja ser avaliado enquanto que *Delta* representa o intervalo de tempo entre as intervenções.

A identificação do intervalo de tempo no qual houve intervenção deve ser feita de forma a multiplicar o número de genes pelo intervalo de tempo determinado, chegando ao intervalo de tempo que se é feita uma intervenção de manutenção preventiva.

Feito esta transformação de real para binário, são fornecidos ao algoritmo os dados de entrada característicos ao estudo dos indivíduos que são o tamanho da população gerada, o número de gerações, o número de iterações, as probabilidades de mutação, crossover e os cortes do crossover. Para a análise do efeito dos indivíduos no fitness do problema, ainda há a inserção de dados de entrada como o tempo de missão, o intervalo de tempo da análise, os custos de manutenção e correção, o número de realizações para cada indivíduo no tempo de missão, a função de confiabilidade e a(s) respectiva(s) taxa(s) de falha para os componentes em estudo e o número de componentes do sistema citando quantos estão em paralelo e quantos estão em série.

3.6. Apresentação de um sistema piloto

Para validação do modelo, é proposto um sistema piloto composto de três componentes dispostos em série-paralelo conforme figura a seguir:

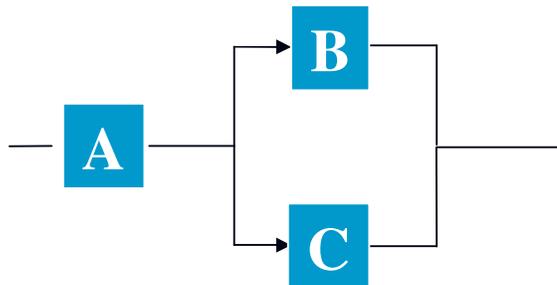


Figura 3-2 – Diagrama de blocos do sistema piloto

As taxas de falha em dias de cada componente estão dispostas na tabela abaixo:

Tabela 3-1- Distribuição e taxa de falhas por componente do sistema piloto – CENÁRIO 1

Componente	Distribuição	Taxa de Falha
A	Exponencial	0,2
B	Exponencial	0,25
C	Exponencial	0,33

Além disso, para estudo do sistema em dois cenários diferentes, outra configuração com taxas de falha mais baixa foi feita para uma análise comparativa, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 3-2- Distribuição e taxa de falhas por componente do sistema piloto – CENÁRIO 2

Componente	Distribuição	Taxa de Falha
A	Exponencial	0,05
B	Exponencial	0,066
C	Exponencial	0,076

Os custos de manutenção em reais foram mantidos os mesmos para os dois cenários e são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 3-3 –Custo por tipo de manutenção

Componente	Custo de Manutenção	
	Preventiva	Corretiva
A	240,00	720,00
B	140,00	520,00
C	80,00	240,00

Abaixo segue o parâmetro para avaliação da qualidade do serviço de manutenção, tendo $q=1$ como sendo o índice da manutenção que indica que o equipamento voltou tão bom quanto novo.

Tabela 3-4 Parâmetro de qualidade da manutenção

Componente	q (qualidade da manutenção)
A	0,85
B	0,80
C	0,82

Fazendo uma análise dos componentes acima, temos que o equipamento com menor taxa de falha possui custos de manutenção mais caros do que os demais, seguindo uma ordem decrescente de custos inversamente proporcional às taxas de falha.

As configurações de Algoritmos Genéticos para o sistema piloto são as mesmas para os dois exemplos. Logo, as únicas mudanças que existem são nas taxas de falhas dos componentes.

3.6.1. Resultados do sistema piloto

Ao se aplicar um tempo de missão de três meses com as configurações acima, tem-se a política de manutenção ótima baseada no menor custo de manutenção mostrada na tabela a seguir:

Tabela 3-5 – Configuração da política ótima para o sistema piloto – CENÁRIO 1

Componente	Tempos de manutenção preventiva (dia)
A	Faça preventiva no(s) dia(s): 25, 45
B	Faça preventiva no(s) dia(s): 15, 45, 55, 75
C	Faça preventiva no(s) dia(s): 15, 35, 45, 75

A confiabilidade condicionada ao reparo de cada componente e do sistema pode ser mostrada nas figuras abaixo:

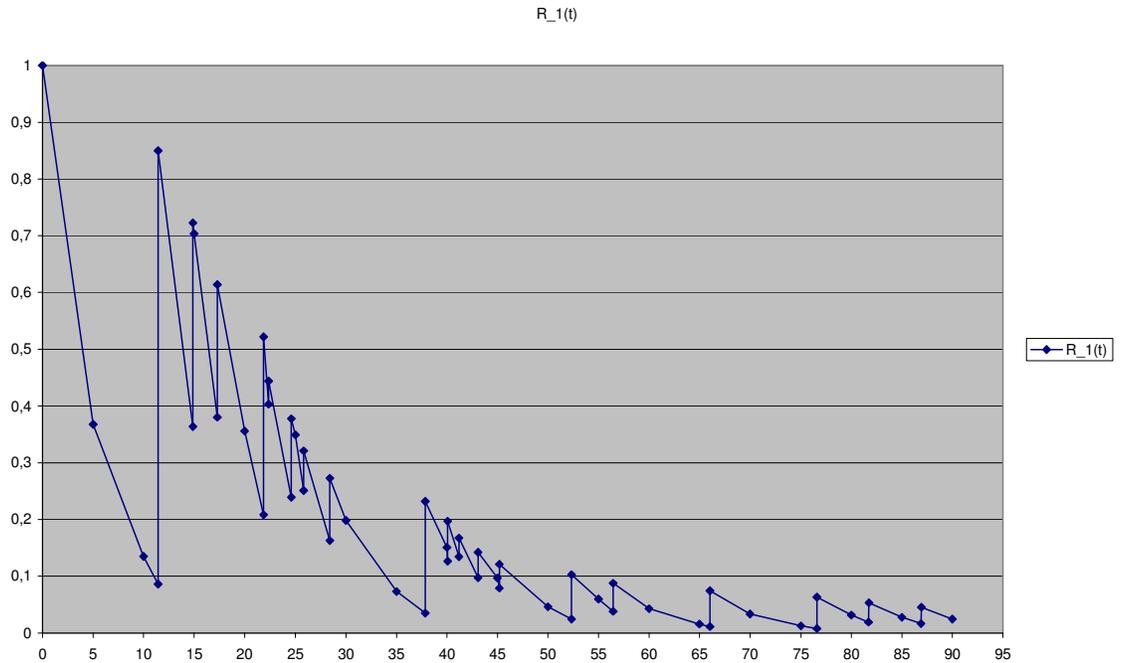


Figura 3-3 – Confiabilidade do componente 1 do sistema piloto – CENÁRIO 1

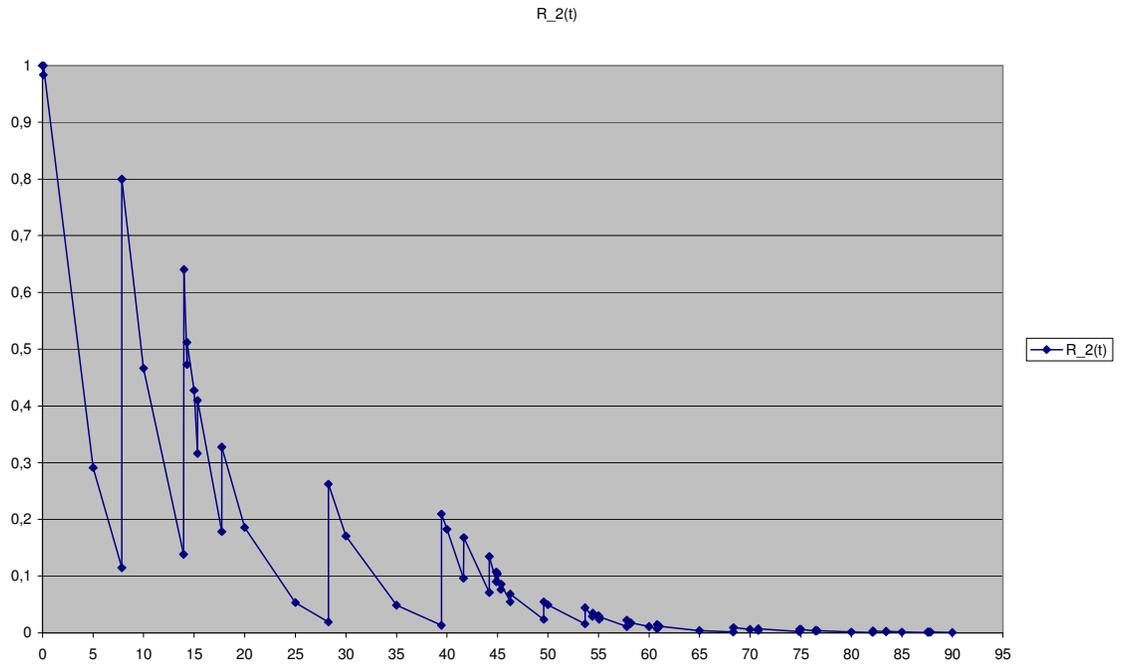


Figura 3-4 - Confiabilidade do componente 2 do sistema piloto – CENÁRIO 1

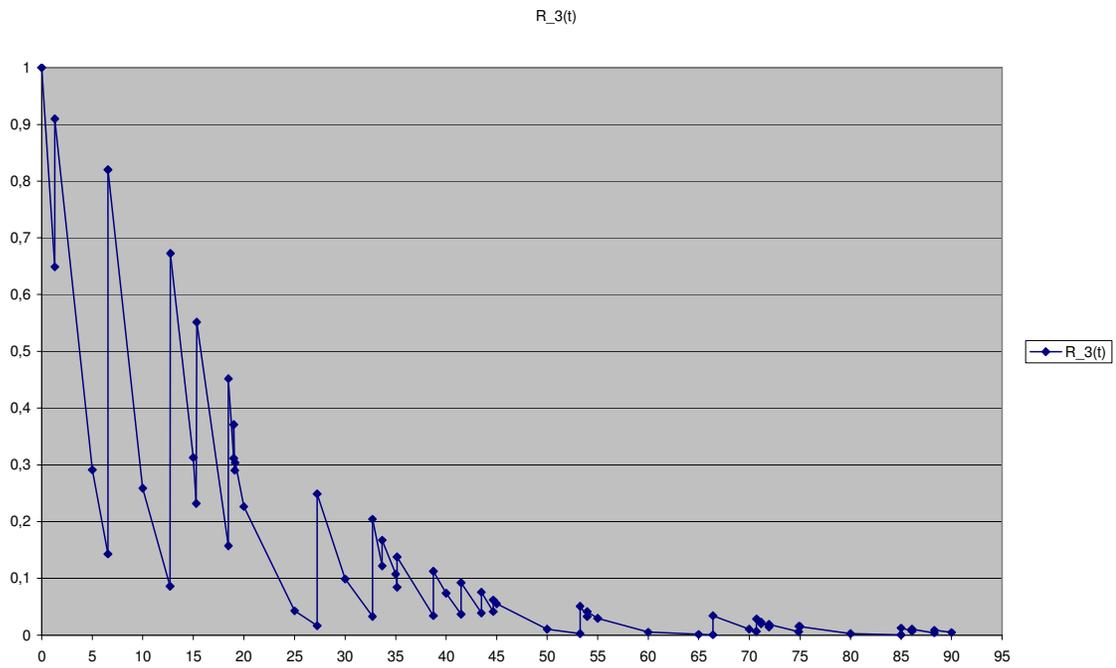


Figura 3-5 - Confiabilidade do componente 3 do sistema piloto – CENÁRIO 1

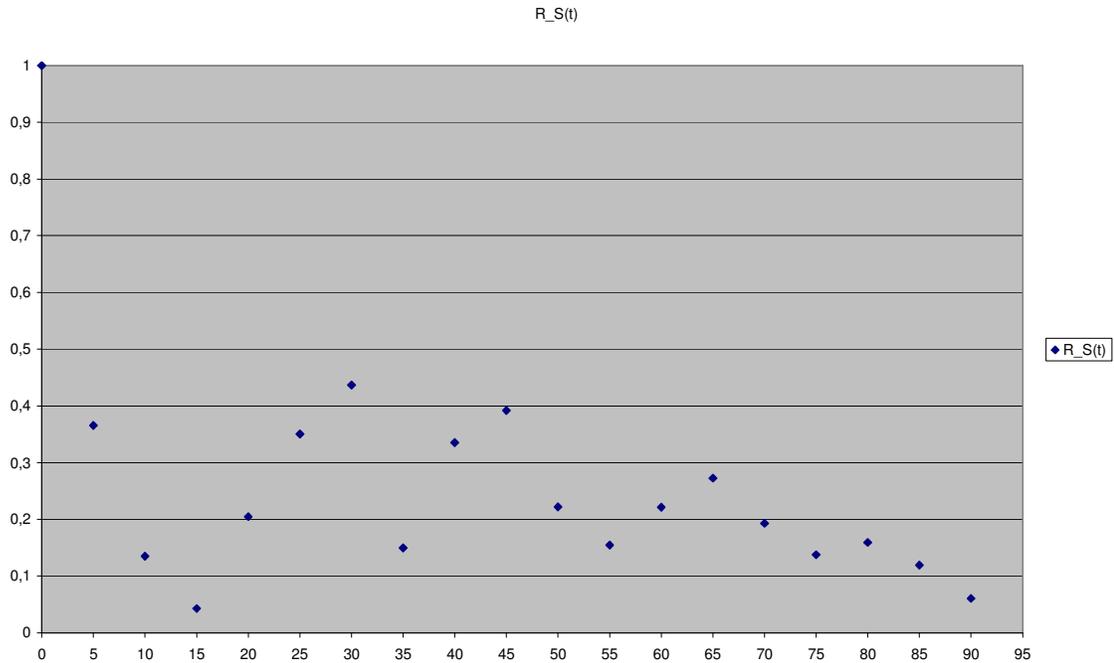


Figura 3-6 - Confiabilidade do sistema piloto – CENÁRIO 1

Como as figuras acima mostram, as confiabilidades mostram-se baixas ao final do tempo de missão de 90 dias e assumem os seguintes valores:

$$R_1(t) = 0,024$$

$$R_2(t) = 0,00089$$

$$R_3(t) = 0,004833$$

$$R_S(t) = 1,06 \cdot 10^{-6}$$

Já o sistema piloto no CENÁRIO 2 possui a seguinte política de manutenção ótima:

Tabela 3-6 – Configuração da política ótima para o sistema piloto – CENÁRIO 2

Componente	Tempos de manutenção preventiva (dia)
A	Faça preventiva no(s) dia(s): 10, 45, 65
B	Faça preventiva no(s) dia(s): 65, 90
C	Faça preventiva no(s) dia(s): 65

Em relação à confiabilidade de cada equipamento e do sistema, as figuras abaixo ilustram o seu comportamento:

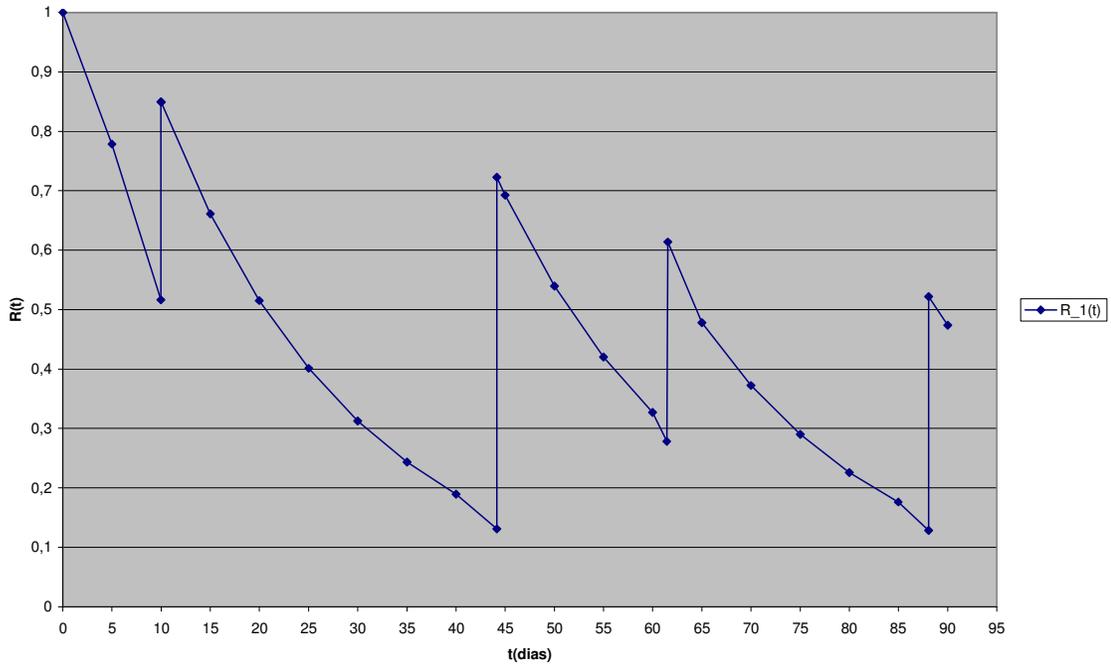


Figura 3-7 - Confiabilidade do componente 1 do sistema piloto – CENÁRIO 2

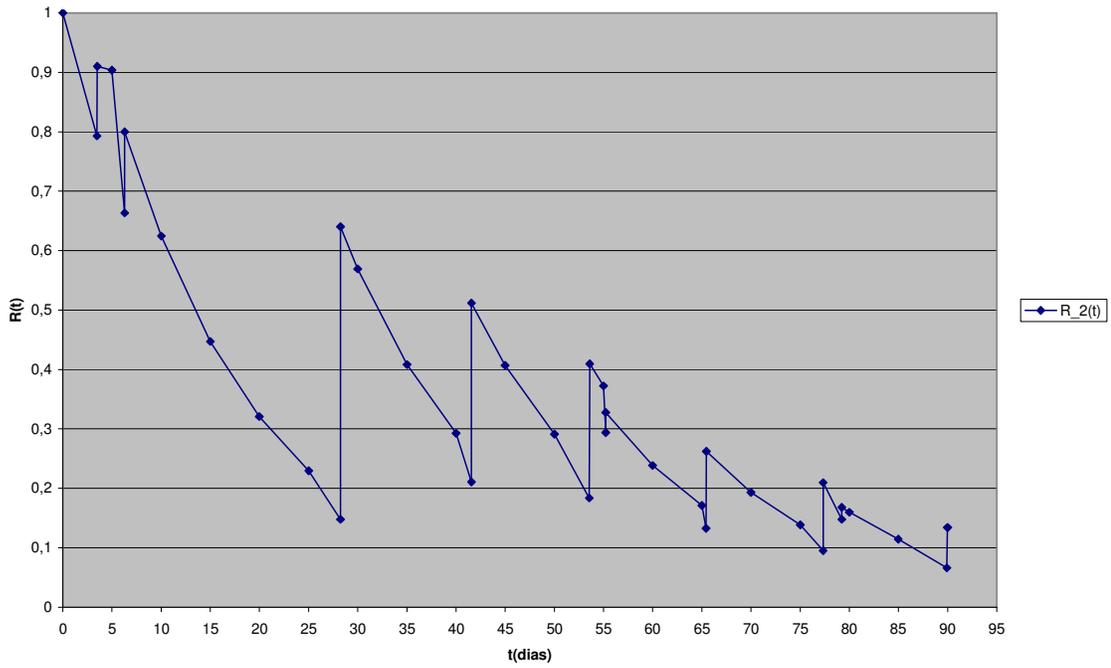


Figura 3-8 - Confiabilidade do componente 2 do sistema piloto – CENÁRIO 2

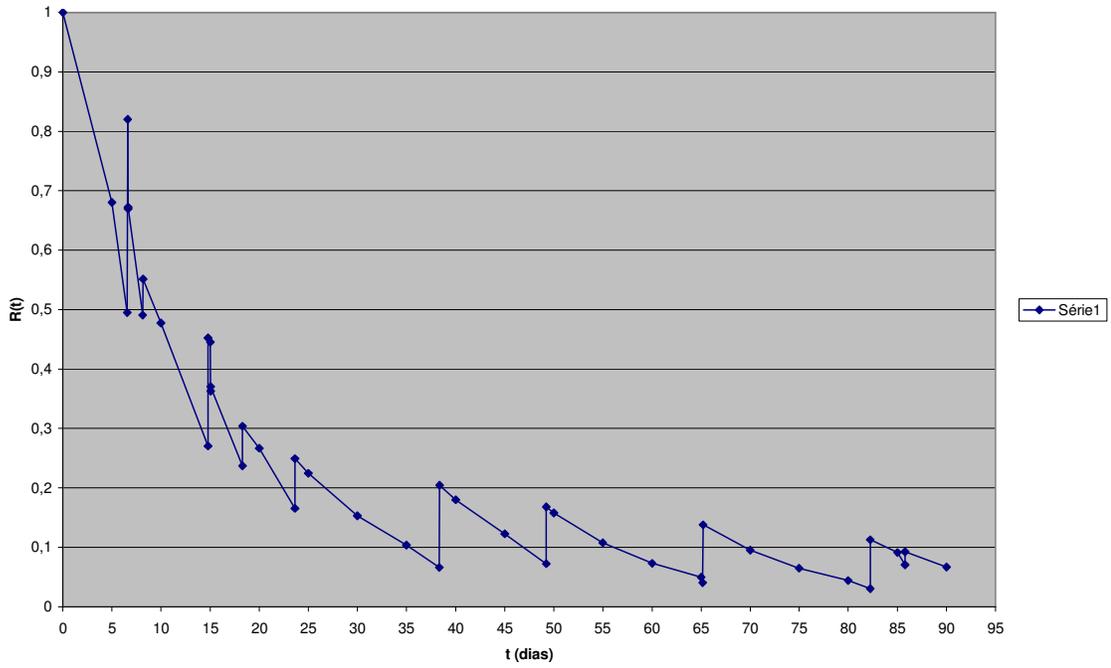


Figura 3-9 - Confiabilidade do componente 3 do sistema piloto – CENÁRIO 2

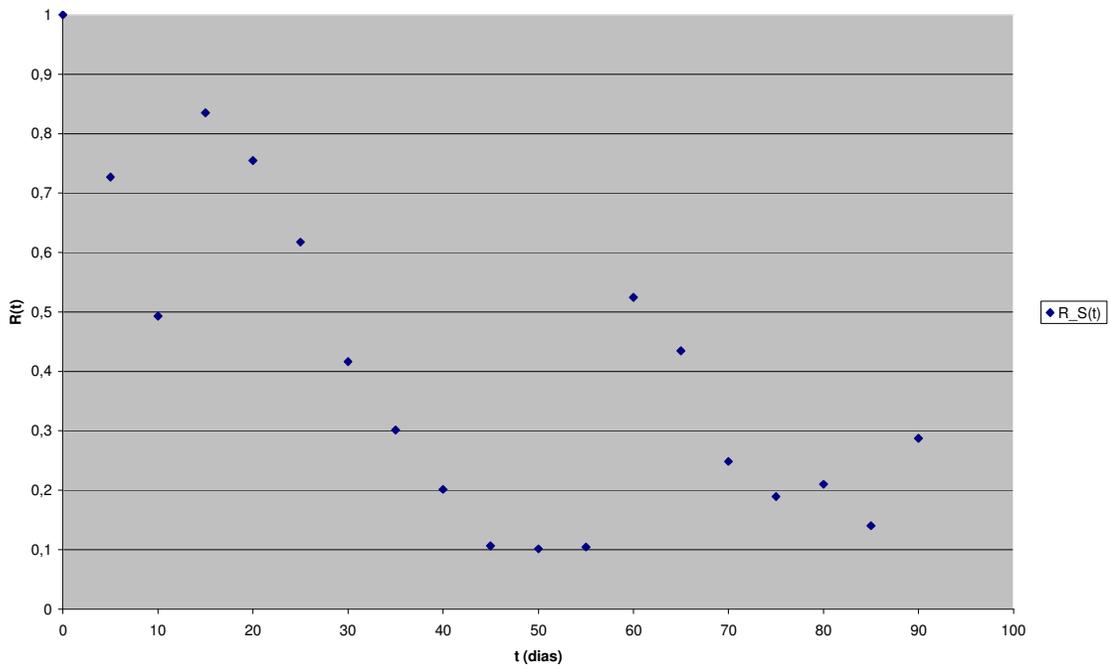


Figura 3-10 - Confiabilidade do sistema piloto – CENÁRIO 2

Nesse caso, as confiabilidades estão relatadas logo abaixo:

$$R_1(t) = 0,473$$

$$R_2(t) = 0,133$$

$$R_3(t) = 0,066$$

$$R_5(t) = 0,287$$

Os resultados acima mostram a importância das taxas de falha e dos custos na hora da obtenção de uma política de manutenção preventiva. Isso reflete no momento em que os custos totais são obtidos ao final de tempo de missão, e a tabela a seguir mostra tais dados:

CENÁRIO	CUSTO MÉDIO TOTAL (em reais)
CENÁRIO 1	27.027,90
CENÁRIO 2	5.827,20

A grande discrepância dos custos comprova as importâncias citadas acima. Mas é importante notar que melhor será o *fitness* quando a combinação custo preventiva/corretiva – taxa de falha proporcionar melhores condições para manutenções de cada equipamento.

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Buscando-se sistemas que apresentam oportunidades para aplicação da metodologia proposta, foi considerada a etapa de secagem da produção de elastômeros, devido à existência de um banco de dados de tamanho considerável para a realização da mineração de dados, no qual os tempos entre falhas e estão relacionados com fatores intrínsecos do sistema.

Neste capítulo, o sistema de produção de elastômero será estimada e analisada em relação a confiabilidade e o custo de realizar uma manutenção. Os resultados serão analisados, com a finalidade de obter informações de qual equipamento apresenta maior confiabilidade, como se comporta a confiabilidade ao longo do tempo, qual a política ótima de manutenção, baseado nos mínimo custo.

A apresentação do modelo será realizada primeiramente com a definição do cenário da linha de produção estudada. Posteriormente, serão fornecidas informações sobre o simulador utilizado para modelagem dos dados e aplicação de ferramentas matemáticas para aquisição de métricas de confiabilidade.

A seguir, são descritos de maneira sucinta alguns conceitos necessários para aplicação da metodologia.

4.1. Introdução ao Estudo Físico-Químico

Os produtos como borrachas, plásticos, têxteis e tintas em geral, apresentam como característica comum, a presença de uma substância polimérica em sua constituição. A complexidade da tecnologia de fabricação de tais produtos se deve:

À ampla gama de matérias-primas;

À diversidade de processos alternativos de produção;

À necessidade de pautar-se pela economia de insumos, mão de obra e equipamento;

A dificuldade de formular adequadamente, não apenas quanto à obtenção dos requisitos desejados no produto final, mas também, quanto à compatibilidade e à interação dos ingredientes, e a boa processabilidade da composição polimérica nos equipamentos de produção.

Polímero é uma substância constituída de macromoléculas formadas de uma mesma unidade estrutural, repetida um grande número de vezes, e que se ligam entre si, covalentemente.

Sendo M a unidade estrutural repetitiva, a macromolécula mais simples, sendo ela linear, pode ser representada genericamente por:

....- M-M-M-M-M-M-M-M-M-M-M-...

Monômero é uma substância simples formada por pequenas moléculas, que dá origem ao polímero. Exemplos:

- o butadieno, $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH} = \text{CH}_2$ é o monômero do polibutadieno
- o estireno, $\text{CH}_2 = \text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$, é o monômero do poliestireno
- o isopreno $\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CH}_3) - \text{CH} = \text{CH}_2$, é o monômero do poliisopreno

Mero é a unidade estrutural da macromolécula, proveniente da molécula do monômero.

Exemplos:

- o mero do polibutadieno é $-\text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 -$
- o mero do poliestireno é $-\text{CH}_2 - \text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5) -$, OU $-\text{CH}_2 - \text{CH} -$

A borracha sintética é definida como um material que é capaz de recuperar-se de grandes deformações rápida e energicamente, e pode ser ou já está modificado num estado em que essencialmente insolúvel em solvente em ebulição tal como benzeno, metil-etil-cetona, e azeotropo etanol-tolueno; uma borracha em seu estado modificado, livre de diluentes, retrai dentro de 1 minuto a menos do que 1,5 vezes o seu comprimento original após ter sido estirado à temperatura ambiente (18 a 29°C) a duas vezes o reduz comprimento e mantido por 1 minuto antes do relaxe. Elastômero é definido apenas como um material macromolecular que retorna rapidamente às dimensões a forma aproximadamente inicial, após substancial deformação produzida por uma fraca tensão e relaxe da mesma.

4.2. Processos de Polimerização

Os principais processos de polimerização, utilizados experimentalmente ou em escala comercial, são os seguintes MIRICA (1995):

- Polimerização em massa

Neste processo, o monômero líquido, sob pressão e temperatura determinadas, é convertido diretamente em polímero, que permanece em solução no próprio monômero, ou precipita-se à medida que se forma.

A maior dificuldade do processo, no caso de monômeros olefínicos, reside na dissipação do calor gerado pela reação, a fim de evitar uma distribuição irregular da massa molecular, bem como o descoloramento e degradação do polímero. Evita-se isso processando a polimerização até conversão de cerca de 50% do monômero, com a remoção excessiva por destilação: outra opção é conduzir a polimerização em moldes apropriados para a formação em placas, varas ou tubos.

Exemplos: polimerização em cadeia do metacrilato de metila, com a utilização de iniciador dissolvido no monômero, ou mesmo sem uso de indicador, provocando-se iniciação da reação por aquecimento; obtenção do poli-(tereftalato de etileno), a partir de mistura de atilenoglicol, tereftalato de dimetila e catalisador, aquecida a 150-210°C.

Vantagem: não há necessidade de remoção de solventes e diluentes, resultando um produto isento de tais impurezas. A presença de monômero livre constitui desvantagem, pois é nociva às propriedades do polímero.

- Polimerização em solução

Neste processo é utilizado com solvente adequado para dissolver o monômero e o indicador, podendo o polímero resultante precipitar-se à medida que se forma, ou permanecer em solução no solvente, caso em que pode ser usada diretamente na produção adesivo, na impregnação de outros materiais, em laminados estratificados e como revestimento, ou a partir da qual é separado o polímero.

Não há aqui problema da dissipação de calor gerado nas polimerizações para obtenção do polímero isolado; possível reatividade do solvente para com o centro ativo da propagação da macromolécula, o que leva a reação de transferência da cadeia, resultando em um polímero de menor massa molecular.

- Polimerização em emulsão

Neste processo, o monômero é disperso sob forma de partículas coloidais de 50 0 1500^a na fase aquosa contendo dissolvido o iniciador, com o auxílio de um agente emulsionante, resultando um polímero sob a forma de látex sintético, que pode ser usado como tal, ou a partir do qual é obtido por coagulação o polímero sólido.

O processo tem como característica a formação de macromoléculas de elevada massa molecular, razão porque se adiciona ao sistema também um modificador, isto é, um agente de transferência de cadeia, a fim de controlar a massa molecular, sem prejuízo da velocidade de reação. Pela mesma razão, tal processo enseja a obtenção de elastômeros estendidos a óleo, com plasticidade adequada ao seu processamento, sem necessidade de intensa mastigação previamente á incorporação dos ingredientes de composição.

- Polimerização em fase gasosa

Neste processo, a fase gasosa é representada apenas pelo monômero inicial, pois após o início da reação de polimerização condensa-se uma névoa de partículas poliméricas com macromoléculas em crescimento, nas quais passa a ocorrer a maior parte da transformação, à semelhança do que sucede na polimerização em emulsão, podendo assim exibir alta velocidade de polimerização e elevada massa molecular.

- Polimerização em fase sólida

Neste processo, o monômero se polimeriza no estado sólido cristalino, em temperatura abaixo de seu ponto de fusão, iniciando-se principalmente por irradiação com radiações ionizantes (raios- γ , raios-x, etc.).

4.3. Etapas de Produção de Elastômeros

No presente estudo, o processo de polimerização é em solução, onde é utilizado o solvente para dissolver o monômero. As Etapas de produção dos elastômeros podem ser divididas resumidamente em 3 processos: Reação, Coagulação e Secagem do polímero. As mesmas serão descritas abaixo.

4.3.1. Reação

Uma vez que o 1,3-butadieno e solvente, principais matérias primas do elastômero, estão purificados, são misturados obtendo-se a alimentação mista purificada (AMP), a qual é secada em leitos de alumina, que absorve grande parte da água ainda presente. Na etapa de reação o AMP, o inibidor de reação (1,2-butadieno) e o iniciador de reação (n-butil-lítio) entram na base dos reatores para formação dos elastômeros. Nessa operação são controladas a temperatura, pressão e vazão.

Segundo HATTORI (1970), em um processo de polimerização contínua, o elastômero sai dos reatores e entra em um tanque de “flash”, onde ocorre a recuperação de solvente, e após esta separação segue para um misturador no qual a reação será terminada com adição de água e dióxido de carbono. Para HUBBY (1982), a reação de polimerização para formação do polibutadieno consiste em uma adição aniônica em solução e fatores como temperatura e natureza do íon são responsáveis pela dissociação e crescimento da cadeia. Na reação irão participar o 1,3-butadieno (monômero), o n-butil-lítio (iniciador da polimerização) e água (terminador de reação). Após essa etapa, a borracha dissolvida, agora chamada de cimento, segue para os tanques coagulação.

4.3.2. Coagulação

Segundo YAMAGUCHI (2005), a finalidade das unidades de coagulação é retirar totalmente o solvente antes de se alimentar as unidades de secagem mecânicas. O processo consiste na vaporização do solvente contido no cimento proveniente dos tanques de mistura.

O cimento que é bombeado dos tanques de mistura passa por um instrumento medidor de vazão para depois atingir um misturador mecânico ou estático, onde é adicionado a substâncias tais como anti-oxidantes, óleos extensores e CO₂. O fluxo de cimento após a saída dos misturadores é controlado por uma válvula de controle automático de fluxo alimentando os vasos de coagulação.

A jusante desta válvula de fluxo (FV), antes de chegar aos vasos coaguladores, a corrente de cimento recebe uma corrente de água (chamada de água de circulação), também sob controle de uma válvula de fluxo, que fará uma mistura de água e cimento numa relação borracha/água específica para ajudar na formação dos coágulos de borracha. Este fluxo de água recebe a montante de sua válvula controladora, um fluxo de vapor para manter a temperatura da água em aproximadamente 100° C.

Para TAKAMI (2002), a próxima etapa é a entrada do solvente no primeiro tanque sofrendo um “flasheamento” devido ao fato que nesse tanque a pressão é em torno de 12”H₂O, que é bem inferior a pressão da linha. Nesse tanque a massa de água e coágulo ainda recebe vapor em sua base para extrair o solvente que se encontra dentro dos coágulos. O segundo tanque apresenta os mesmos princípios de funcionamento do primeiro, sendo utilizado para retirar ainda mais o solvente do coágulo e manter a pressão do sistema. O solvente e vapor que saem do segundo passam por um Knock out, que é um redutor de velocidade, para evitar o transporte de borracha por arraste, podendo provocar baixa eficiência nos condensadores.

Após os condensadores, o solvente e o vapor, agora em estado líquido, seguem para o vaso coletor de solvente. Nesse vaso, ocorre a separação da água e do solvente por diferença de densidade, onde o solvente sobe e a água fica na parte de baixo. Dessa forma o solvente transborda pela chicana e através de bombas, seguem para a área de purificação.

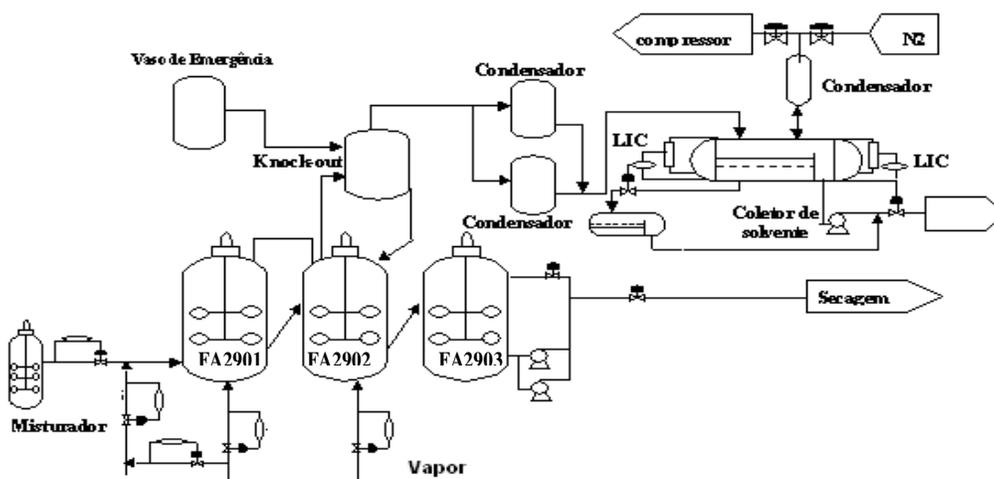


Figura 4-1 – Representação da Etapa de Coagulação de Elastômeros

Os incondensáveis dos condensadores passam por outro trocador de calor e a parte líquida retorna para o coletor de solvente. Quando ocorre a vaporização de solvente, há a formação de coágulos de borracha nos coaguladores, obtendo-se uma mistura de água mais coágulo que fluem por gravidade para os vasos separadores de solvente e destes para os vasos de coágulos, que são abertos para atmosfera. Esse vaso tem a finalidade de operar como vaso de nível para garantir uma alimentação constante das peneiras vibratórias nas secagens mecânicas através de bombas. A figura 3.1 representa o fluxograma detalhado da coagulação.

4.3.3. Secagem Mecânica

O processo de secagem consiste em extrair o máximo de material volátil (basicamente água) do elastômero. O coágulo (polímero com água) é bombeado dos tanques de coágulo para a área de secagem mecânica, alimentando as peneiras vibratórias onde ocorre a separação dos coágulos da água. Essa água é coletada no tanque de água de recirculação e retorna ao processo.

O coágulo agora alimenta as máquinas de secagem propriamente ditas, tais como a desaguadora e secadora. Ambas têm o mesmo funcionamento, que é o transporte de borracha de uma ponta a outra da máquina, por um parafuso sem fim, e na saída encontra-se uma restrição chamada de cone, que pode ser ajustada para aumentar a pressão e extrair a água contida dentro do coágulo. No final da máquina tem-se um pelotizador, cuja função é cortar o coágulo em pedaços menores para facilitar a secagem.

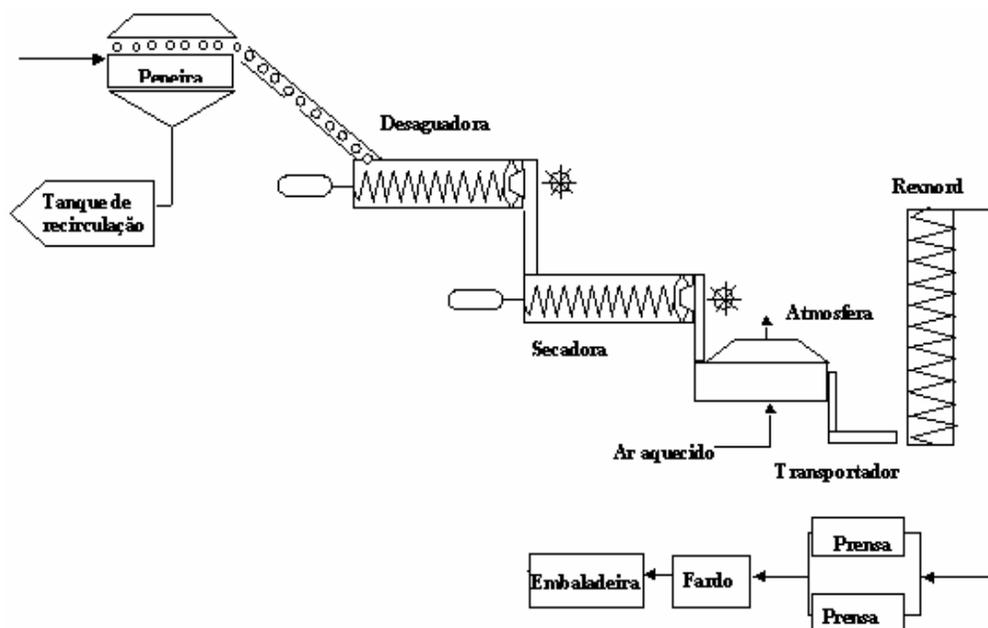


Figura 4-2 – Representação da Etapa de secagem de Elastômeros

O próximo equipamento de secagem é um túnel transportador vibratório com adição de ar quente na base e exaustão no topo. Em seguida tem-se um transportador vertical em forma de helicóide. Nele também há adição de ar quente em cada calha. Ao final da secagem, tem-se duas prensas para transformar o elastômero em fardos.

Para entender cada etapa do processo, segue abaixo um detalhamento dos principais equipamentos da secagem de elastômeros:

Peneira Vibratória

Este equipamento é responsável pela retirada do excesso de água nos coágulos. Ele possui um exaustor para retirada de vapores de água e hidrocarbonetos ainda presentes na mistura.

Desaguadora de Elastômeros

São prensas que recebem os coágulos provenientes da peneira vibratória. Esta máquina é formada por um eixo helicoidal sem fim (parafuso), que é envolvida por um canhão segmentado, ocorrendo à extração de água dos coágulos. Esta compressão passa por uma área regulável, a qual regula a passagem dos coágulos pela variável que realizará a extrusão deste coágulo.

São projetadas para receber coágulos com presença de umidade entre 40-60% e descarregar na secadora entre 6-12% de umidade. O modelo mais eficiente para a utilização no processo dependerá da capacidade, do tipo de elastômero e da quantidade de água a ser removido no processo. A capacidade determinará o diâmetro do equipamento (7", 10.25", 14",

16", 18"). A capacidade de produção varia entre 500 kg/h a 12000 Kg/h. Os motores das máquinas variam de 150hp a 1.500 hp. O tipo de elastômero e a quantidade de água a ser removida, determinam também a relação entre o comprimento e o diâmetro da máquina.



Figura 4-3 – Máquina Desaguadora de Elastômero Fonte: FRENCH OIL (2006)

Secadores Mecânicos:

São usados para muitos tipos de borracha sintética. Os secadores mecânicos normalmente secarão o material que saíram da desaguadora a uma umidade entre 8-12%. A secagem pela máquina é realizada transportando e aquecendo o polímero por um parafuso sem fim, de uma ponta a outra da máquina. Na saída da máquina encontra-se uma restrição de passagem (placa de orifício), que pode ser ajustada para aumentar a pressão, e assim, evaporar a água contida no polímero. Em geral, a capacidade de produção das máquinas secadoras varia de 2000Kg/h a 8000Kg/h.



Figura 4-4 – Uma Máquina Secadora de Elastômero Fonte: FRENCH OIL (2006)

Túnel Transportador Vibratório

Uma operação de transporte vibratório é baseada tipicamente no princípio natural da frequência. Na frequência natural, o transporte vibra indefinidamente com somente uma entrada de energia. Uma vez a movimentação se inicia, a vibração do transporte, as molas (ver Figura 4-5) armazenam e liberam a maioria da energia requerida, ajudando a manter o movimento constante. Na operação, a movimentação transmite a vibração através das molas de sustentação à calha. A vibração da calha joga continuamente o material para cima e envia-o, assim movendo o material em pulos curtos ao longo do transporte. A movimentação é feita tipicamente por um motor elétrico com um eixo excêntrico fixo.

Também têm função de secar a borracha através de um fluxo de ar quente, que é direcionado na parte inferior da máquina. Sua base é contínua de aço estrutural ao longo do comprimento do transporte e a calha tem revestimentos especiais disponíveis para produtos pegajosos. Na região superior contêm um exaustor, para retirar dos vapores existentes no interior do equipamento.



Figura 4-5 – Base do Transportador Vibratório Fonte: CARRIER (2006)

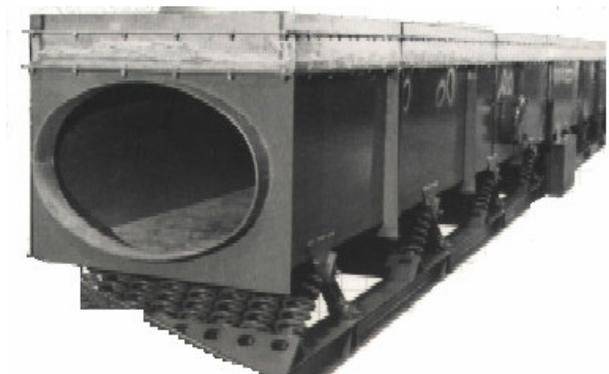


Figura 4-6 – Transportador Vibratório (Fonte: Carrier,2006)

Transportador Helicoidal

Os elevadores espirais vibratórios usam os mesmos princípios de vibração dos de outros transportadores. Entretanto, o elevador espiral tem uma calha na forma helicoidal, diferente de calhas retas e de grandes comprimentos. O produto é introduzido através de um bico da alimentação no fundo da unidade e movido para cima enquanto faz círculos em torno de um tubo central. O material é descarregado em uma altura de até 60 pés acima do ponto da alimentação. São projetados para elevar os coágulos sem derramar o produto. Esse equipamento também tem a função de complementar a secagem do produto, recebendo fluxo de ar quente pelas suas calhas. Em geral, são Disponíveis de 11 pés de até 60 pés alturas. A superfície de contato do equipamento pode ser revestida de plasma ou Teflon, para que o produto não adere ao equipamento.



Figura 4-7 – Transportadores Helicoidais (Fonte: Carrier)

Sistema de Prensagem

A finalidade das prensas é conformar a borracha sintética em fardos de formato retangular de dimensões, com uma massa especificada. As prensas deverão operar com uma pressão de 2500 lbs/pol² para que os fardos sejam uniformes e bem prensados.

O sistema de prensagem é composto por três subsistemas: caçamba, balança e prensa. Este último, por sua vez, é formado por três conjuntos: mesa cobertora, base e mesa de prensagem. Para melhor entender a disposição dos subsistemas, observar a Figura 4-8

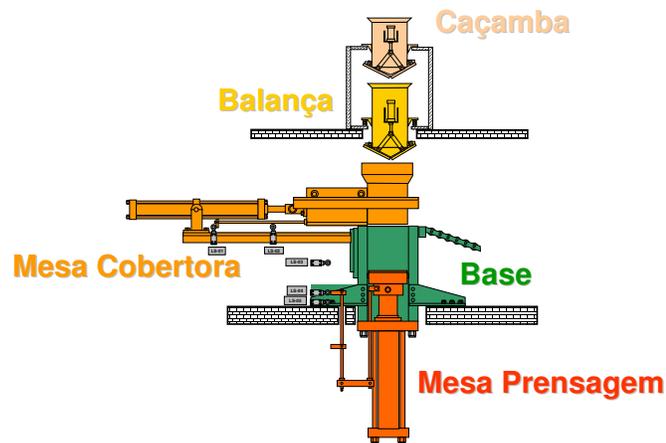


Figura 4-8 – Desenho esquemático de uma prensa

A Caçamba tem a função de controlar a alimentação da balança. Ela recebe a borracha de dutos de alimentação, funcionando inicialmente com seus dois flap's abertos, dando passagem para a alimentação da balança, até atingir o *set-point*. Neste momento a caçamba fecha seus flap's, interrompendo a alimentação da balança. A abertura da caçamba é comandada por um sistema pneumático, composto de pistões, que são acionados por um sinal emitido pela balança assim que for atingido o *set-point*. Quando os pistões estão retraídos, fecham-se os flap's, enquanto que, quando estão estendidos, abrem-se os flap's. Essa operação é comandada através de um sinal dado por uma válvula solenóide.

A Balança é alimentada com seus flap's fechados até atingir o *set-point*. Após esse valor, um módulo eletrônico que processa o sinal da célula de carga, envia um sinal para a caçamba fechar seus flap's e parar a alimentação. A célula de carga afere o peso da carga até alcançar o *set-point*. Em seguida a balança abre os flap's de descarga, alimentando as prensas. A balança tem um conjunto de componentes praticamente idênticos às caçambas, acrescentando-se apenas a célula de carga e o módulo eletrônico.

Na prensa existe, dentre outros, o sistema hidráulico que é composto por válvulas direcionais, as quais multiplicam a pressão do óleo, acionada por bombas que circulam através dos cilindros cobertores e o principal, que é responsável pela compressão conformando a borracha sintética em fardos. O sistema elétrico é comandado pelo painel da prensa através das chaves "temporisadoras" acionando todos os LS (Atuadores Limite), os quais são responsáveis por informar o final do ciclo a cada cilindro, comandando a prensagem dos fardos de borracha no modo automático.

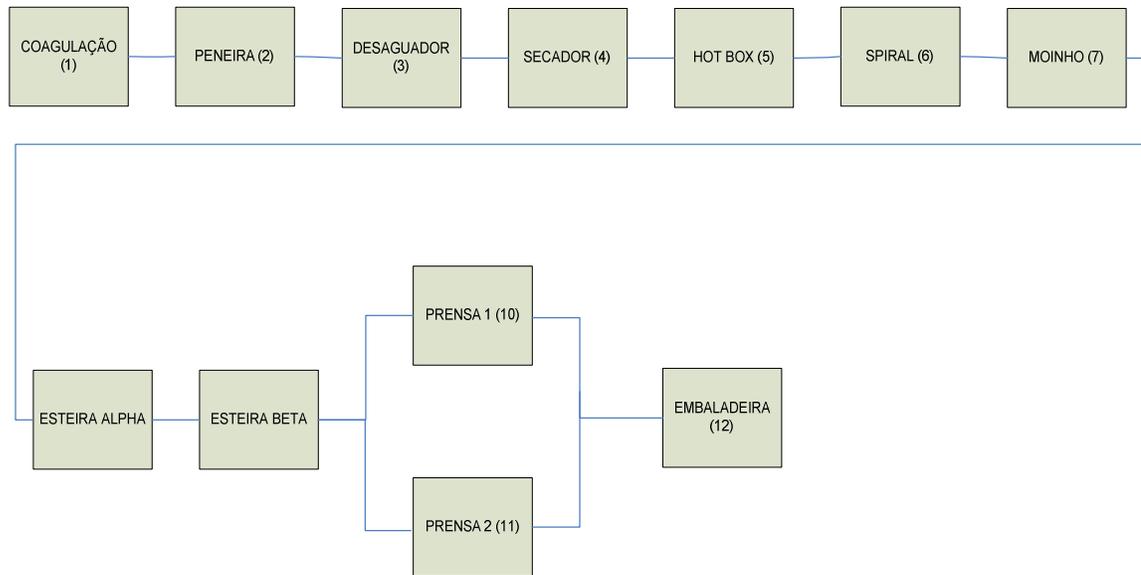


Figura 4-9 – Diagrama de blocos para o sistema em estudo

4.4. Análise de Dados

4.4.1. Descrição do Problema

Empresas cujos produtos são de alto valor agregado (como derivados do petróleo apresentado nessa aplicação), necessitam de alto nível de confiabilidade, devido a perda por produção cessante representar um prejuízo significativo no faturamento da corporação. Porém, altos níveis de confiabilidade podem representar altos custos de manutenção para as empresas que almejam alcançar esse resultado MARSEGUERRA (2006). Segundo RAUSAND (1996), é necessária uma abordagem específica para a análise do perfil de produção do sistema ao longo da sua vida útil e a influência da indisponibilidade nos sistemas produtivos.

O sistema disposto é constituído de um histórico de paradas que vem a comprometer a funcionalidade do mesmo para o cumprimento do seu objetivo maior, que é alcançar métricas satisfatórias de produtividade. Esse histórico é o obstáculo a ser superado de uma forma executada pelo método apresentado anteriormente, ou seja, otimizar as métricas a partir de uma função objetiva constituída pelo custo total esperado de manutenção.

As equipes de manutenção preventiva destinada a cada equipamento possuem índices que medem sua qualidade de manutenção. De acordo com métodos de educação direto vistos em

FIRMINO (2004), um levantamento de probabilidades é feito para cada equipe de manutenção. Essas probabilidades indicam qual a chance de certa equipe de manutenção executar uma manutenção bem sucedida. Mais um problema a ser considerado é o fato de que, apesar da maioria das equipes terem um índice intermediário de qualidade nos serviços de manutenção, o sistema está disposto em série (ver Figura 4-9), isso faz com que o sistema apresente uma baixa confiabilidade ao final da realização do tempo de missão determinado.

Os dados foram coletados num período de 2 anos, e dizem respeito às falhas que ocorreram nos equipamentos constituintes do sistema de produção de Elastômeros. Estes dados são válidos apenas para plantas que possuam equipamentos e processo semelhantes a esta.

As paradas foram registradas a partir de um Gerenciador, cujos campos continham: data da parada, hora inicial, hora final, motivo da parada e classificação. A data da parada é preenchida com o dia, mês e ano em que a parada ocorreu. A hora de início fornece a hora em que o sistema parou, a hora final fornece a hora em que o sistema voltou a produzir Elastômero. Esse período de tempo decorrido entre a hora inicial e final compreende: a hora em que o sistema parou, o tempo em que a equipe de manutenção levou para diagnosticar o problema e o tempo efetivo de reparo. O motivo da parada contém a descrição do que ocorreu para a parada do sistema.

4.4.2. Aplicação dos testes

No estudo de caso avaliado neste trabalho, a modelagem dos dados foi feita a partir da classificação por equipamentos tendo como exceções apenas os subsistemas de causas externas. Sendo assim, o tratamento dos dados passou a ter um nível de detalhe em relação a sua análise. Além do mais, de acordo com a realização dos testes para cada equipamento e subsistemas, foi possível uma classificação de acordo com o grupo de modelagem que cada um seguiu: Modelagem HPP ou Modelagem NHPP.

4.4.3. Resultado dos testes

4.4.3.1. Modelagem HPP

A modelagem via HPP busca mostrar como se comportam os equipamentos que possuem taxa de falha constante e herdada, depois de verificadas as devidas condições de adequação do modelo HPP, as propriedades de tal modelagem.

Segue abaixo os resultados das análises dos equipamentos que foram adequados a um HPP:

Sistema de Coagulação

Neste sistema, o teste de tendência de Laplace indica, através de sua estatística e confirmação pelo seu p-valor, uma rejeição à hipótese de que os dados seguem um modelo NHPP. Em seguida, o teste de Kolmogorov-Smirnov indica um ajustamento dos dados observados de tempos entre falhas à distribuição exponencial, o que confirma a adoção de um modelo HPP.

Tabela 4-1 – Valores referentes ao estudo do Subsistema de Coagulação

Especificações	Valores obtidos
Estatística – Teste MIL-HDBK-189	170,7284152
P-valor – Teste MIL-HDBK-189	2E-09
Média	450,1579
Estimação do parâmetro	0,0022

Peneira

Em relação à modelagem inferida aos dados representantes desse equipamento, o primeiro passo refere-se a sua análise em relação a uma possível modelagem via Processo Homogêneo de Poisson ou, caso contrário, via Processo Não-Homogêneo de Poisson. Para isso, coube ao teste de Laplace mostrar pela eficiência de sua estatística e comprovação da medição do seu p-valor afirmar que o Equipamento Peneira segue um modelo HPP.

Depois de realizada a análise em relação a sua modelagem, a constatação de que os dados se ajustam a alguma distribuição paramétrica facilita a compreensão do processo de falha do equipamento. Nesse caso, os testes de aderência são responsáveis pela indicação da existência ou não de aderência a uma determinada distribuição. Mais especificamente, o uso do teste de Kolmogorov-Smirnov foi requerido, resultando em uma aderência dos dados observados de tempos entre falhas a uma distribuição exponencial.

Tabela 4-2 – Valores referentes ao estudo do equipamento Peneira

Especificação	Valores obtidos
Estatística - Teste de Laplace	-9,346870217
P-valor – Teste de Laplace	0,227328
P-valor – Teste K-S	0,625

Média	509,3
Estimação do Parâmetro	0,001963294

Como a distribuição é exponencial, a taxa de ocorrência de falhas (ROCOF) é constante, e corresponde ao LAMBDA.

Transportador Horizontal (Hot Box)

Assim como foi feito com a Peneira, os dados do Transportador horizontal foram testados para a verificação de alguma tendência através do teste de Laplace, o qual apontou tendência para um modelo HPP. Em seguida, o teste de Kolmogorov-Smirnov indicou uma aderência dos dados observados de tempos entre falhas à distribuição exponencial.

Tabela 4-3 – Valores referentes ao estudo do equipamento Hot Box

Especificação	Valores obtidos
Estatística - Teste de Laplace	-21,7732524
P-valor – Teste de Laplace	0,212002
P-valor – Teste K-S	0,538
Média	320,8
Estimação do Parâmetro	0,00311

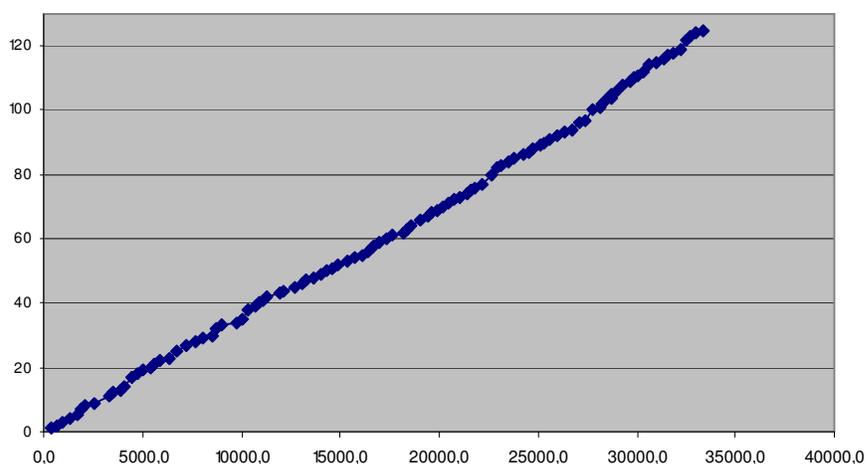


Figura 4-101 – Gráfico do número de falhas ao longo do tempo do Hot Box

Transportador Vertical (Spiral)

O Transportado Vertical também faz parte do grupo de equipamentos cujos dados são modelados por um modelo HPP, segundo o teste de Laplace. Em relação ao teste de aderência, o teste K-S indicou que os dados observados de tempos entre falhas também aderiram a uma distribuição exponencial.

Tabela 4-4 – Valores referentes ao estudo do equipamento Transportador Vertical

Especificação	Valores obtidos
Estatística - Teste de Laplace	-27,16704555
P-valor – Teste de Laplace	0,116059
P-valor – Teste K-S	0,681
Média	67,6
Estimação do Parâmetro	0,014799

Esteira Beta

Segundo o teste de Laplace, os dados referentes a Esteira Beta são modelados por um modelo HPP. Sendo aplicado o teste de aderência K-S, os resultados indicaram mais uma vez uma aderência dos dados observados de tempos entre falhas a uma distribuição exponencial.

Tabela 4-5 – Valores referentes ao estudo do equipamento Esteira Beta

Especificação	Valores obtidos
Estatística - Teste de Laplace	-14,38896708
P-valor – Teste de Laplace	0,208902
P-valor – Teste K-S	0,372
Média	228,2
Estimação do Parâmetro	0,004382539

Embaladeira

O teste de Laplace, aplicado em mais uma base de dados agora referentes a embaladeira, indicaram que os dados tendem a serem modelados por um modelo HPP. O teste K-S indica aderência dos dados observados de tempos entre falhas a uma distribuição exponencial.

Tabela 4-6 – Valores referentes ao estudo do equipamento Embaladeira

Especificação	Valores
Estatística - Teste de Laplace	-10,10584911
P-valor – Teste de Laplace	0,217269
P-valor – Teste K-S	0,124
Média	350,6
Estimação do Parâmetro	0,0028

Prensa 1

Os dados deste equipamento foram testados pelo teste de Laplace que apresentou estatística e p-valor como evidências suficientes para aceitação da hipótese nula.

Tabela 4-7 – Valores referentes ao estudo do equipamento Prensa 1

Especificações	Valores obtidos
Estatística – Teste Laplace	-21,7732453
P-valor – Teste MIL-HDBK-189	0,191769
Média	213,6
Estimação do parâmetro	0,0046

Máquina Desaguadora

Para este equipamento os mesmos procedimentos de aplicação do teste de Laplace foram tomados e que por sua vez indicaram evidências para um modelo HPP. Ao analisarmos o gráfico de número de falhas ao decorrer do tempo, vemos que a taxa de falha se mantém constante ao decorrer do tempo.

Tabela 4-8 – Valores referentes ao estudo do equipamento Máquina Desaguadora

Especificação	Valores obtidos
Estatística - Teste de Laplace	-22,18268385
P-valor – Teste de Laplace	0,258325
Média	261,18
Estimação do Parâmetro	0,0038

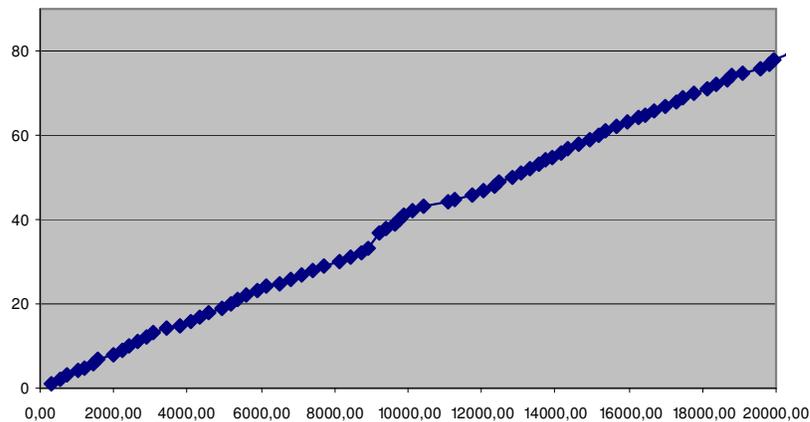


Figura 4-11 – Gráfico do número de falhas ao longo do tempo da Desaguadora

4.4.3.2. Modelagem NHPP

No caso de ser inferida a modelagem de um Processo Não-Homogêneo de Poisson, os testes que se aplicam ao conjunto de dados subsequentes foram determinantes para a tomada de decisão sobre tal modelo. Sendo assim, os resultados de alguns testes influenciaram na indicação de outros.

Nos equipamentos em que ficou comprovada a modelagem por NHPP através do teste MIL-HDBK-189 e o teste de Cramér Von Mises, os casos em que os dados não possuem tendência para um modelo HPP foram utilizados de acordo com a necessidade de cada equipamento.

Segue então, o processo de modelagem dos equipamentos que se adequaram a um modelo NHPP.

Máquina Secadora

Os dados referentes à Secadora foram usados para o teste MIL-HDBK-189 que acusou mediante a análise de sua estatística e confirmação do seu p-valor uma tendência sofrida pelos dados para um modelo NHPP. O gráfico do número de falhas acumulado ao longo do tempo é ilustrado da seguinte forma.

Tabela 4-9 – Valores referentes ao estudo do equipamento Máquina Secadora

Especificações	Valores obtidos
Estatística – Teste MIL-HDBK-189	920,0312257
P-valor – Teste MIL-HDBK-189	3,1E-102

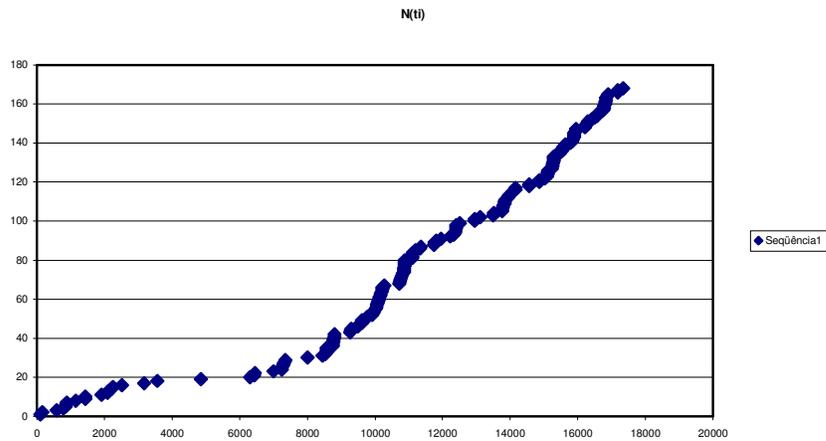


Figura 4-12 – Gráfico do número de falhas ao longo do tempo da Secadora

Moinho

O teste MIL-HDBK-189 também foi aplicado para este equipamento e sua estatística, juntamente com seu p-valor, indicaram evidências suficientes para a rejeição da hipótese nula em favor da alternativa. Sendo assim, aplicou-se o teste de Cramér Von Mises e foi verificado o ajuste ao processo Power Law de acordo com o valor tabelado. O gráfico do número de falhas acumuladas mostra que ao longo do tempo que a taxa de falha decresce.

Tabela 4-10 – Valores referentes ao estudo do equipamento Moinho

Especificações	Valores obtidos
Estatística – Teste MIL-HDBK-189	626,5717407
P-valor – Teste MIL-HDBK-189	1,72E-67
Valor obtido – Teste de Cramér Von Mises	0,123314

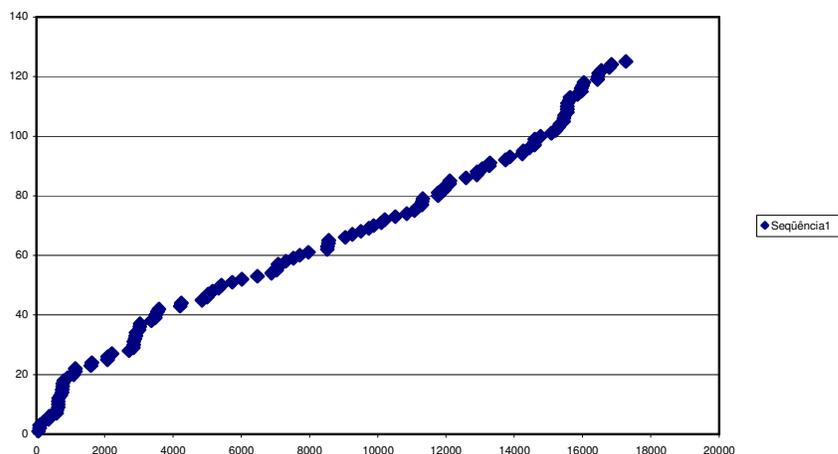


Figura 4-13 – Gráfico do número de falhas ao longo do tempo do Moinho

Esteira Alpha

A aplicação do teste MIL-HDBK-189 para este equipamento resultou em evidências suficientes para a rejeição da hipótese nula em favor da alternativa. Em relação ao teste de Cramér Von Mises, o valor da estatística resultou dentro do limite indicado pelo valor tabelado, levando a conclusão de ajustamento a um processo Power Law. É bastante notável na curva que representa o número de falhas acumulado que a taxa de falha é crescente.

Tabela 4-11 – Valores referentes ao estudo do equipamento Esteira Alpha

Especificações	Valores obtidos
Estatística – Teste MIL-HDBK-189	333,0519209
P-valor – Teste MIL-HDBK-189	3,02E-35
Valor obtido – Teste de Cramér Von Mises	0,187156

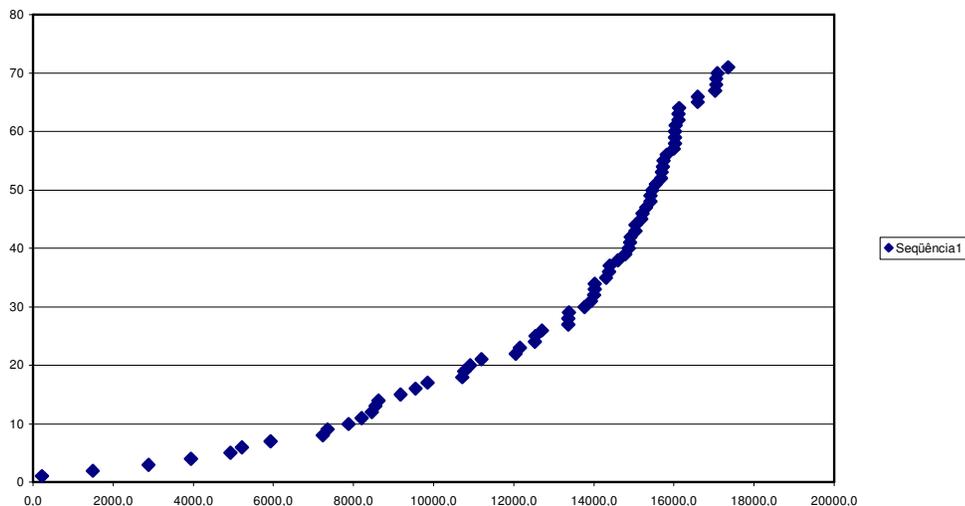


Figura 4-14 – Gráfico do número de falhas ao longo do tempo da Esteira Alpha

Prensa 2

Este equipamento apresentou através do teste MIL-HDBK-189, tendência a um modelo NHPP, como indica a sua estatística e seu p-valor. Ao ser testado pelo teste de Cramér Von Mises, seus dados se ajustaram a um processo Power Law, já que o valor obtido foi menor que o valor tabelado, não tendo assim necessidade para realizar uma estimação de curvas.

Tabela 4-12 – Valores referentes ao estudo do equipamento Prensa 2

Especificações	Valores obtidos
Estatística – Teste MIL-HDBK-189	748,6838366
P-valor – Teste MIL-HDBK-189	1,37E-83
Valor obtido – Teste de Cramér Von Mises	0,181286
Estatística R ² - Estimação de Curvas	-----

Ao fim da análise dos tempos entre falhas, pode-se obter um quadro analítico e comparativo sobre as estatísticas obtidas nos testes para cada equipamento e também os respectivos p-valores representantes de cada equipamento.

Tabela 4-13 – Estatística dos testes de tendência

Subsistema	Teste de Laplace	Hipótese apontada	Teste MIL-HDBK-189	Hipótese apontada
Sistema de				
Coagulação	-10,11515961HPP		17,28746401HPP	
Peneira	-9,346870217HPP		14,52935819HPP	
Máquina				
Desaguadora	-22,18268385HPP		90,46662992NHPP	
Máquina Secadora	-22,45150566NHPP		160,2546114NHPP	
Transportador				
Horizontal (Hot				
Box)	-21,7732524HPP		164,3276838HPP	
Transportador				
Vertical (Spiral)	-27,16704555HPP		207,0400723HPP	
Moinho	-19,05508434HPP		132,6215292NHPP	
Esteira Alpha	-14,18340945NHPP		26,05091632NHPP	
Esteira Beta	-14,38896708HPP		40,35662134HPP	
Prensa 1	-21,7732453HPP		146,4113726HPP	
Prensa 2	-20,19655429NHPP		101,6451324NHPP	
Embaladeira	-10,10584911HPP		31,17569509HPP	

Tabela 4-14 – P-valor dos testes de tendência

Subsistema	Teste de Laplace	Hipótese apontada	Teste MIL-HDBK-189	Hipótese apontada
Sistema de				
Coagulação	0,196098HPP		2,00E-09NHPP	
Peneira	0,227328HPP		1,07E-11HPP	
Máquina				
Desaguadora	0,258325HPP		7,3E-104NHPP	
Máquina Secadora	0,194312NHPP		3,1E-102NHPP	
Transportador				
Horizontal (Hot				
Box)	0,212002HPP		6,03E-94HPP	

Transportador		
Vertical (Spiral)	0,116059HPP	3,3E-151HPP
Moinho	0,154681HPP	1,72E-67NHPP
Esteira Alpha	0,221084NHPP	3,02E-35NHPP
Esteira Beta	0,208902HPP	2,93E-35HPP
Prensa 1	0,191769HPP	3,78E-98HPP
Prensa 2	0,252319NHPP	1,37E-83NHPP

4.4.3.3. Eficácia e Eficiência da manutenção

Para ROCHA (2006) a eficácia de uma ação de manutenção pode ser entendida como o quanto uma ação de reparo é capaz de recuperar um sistema falho, i.e., para qual estado de desempenho o sistema é conduzido após o reparo, enquanto a eficiência de uma ação de manutenção está relacionada ao modo como ela foi executada, i.e., se foram tomadas todas as medidas necessárias para retornar o equipamento o mais rápido possível a operação, seguindo os procedimentos e normas adequadas. Não necessariamente o equipamento será conduzido a um estado diferente (melhor ou pior) ao que possuía antes da intervenção.

Para avaliarmos a eficácia do serviço da manutenção no estudo aplicado, foi utilizado o conhecimento do especialista, pois não existe um banco de dados sobre o desempenho humano com as informações necessárias sobre a eficácia de manutenção, o que leva à dependência do conhecimento do especialista. Segundo AYYUB (2001) especialistas são pessoas experientes e com treinamento e conhecimento em alguma área específica. Porém, para eduzir esse conhecimento, implica em altos custos, devido ao fato do elevado tempo que demanda o processo e o elevado o valor da hora de um especialista.

De acordo com uma análise formal do especialista tem como objetivo inicial estimar os valores possíveis de um dado parâmetro incerto para representar corretamente a incerteza associada a ele na luz do atual estado do conhecimento disponível na comunidade científica.

Segundo MENEZES (2005), extrair do especialista este conhecimento tem sido um grande desafio para muitos psicólogos e pesquisadores da área ao longo dos anos. Atribui-se esta dificuldade às incertezas associadas à probabilidade subjetiva e ao protocolo utilizado para obter tal conhecimento.

O processo de determinação do parâmetro da eficácia da manutenção (q) consiste na elicitación de opiniões de especialistas em relação a medidas de tendência central. Essas medidas darão a forma da distribuição a qual reflete o nível de credibilidade da opinião do

especialista acerca do parâmetro de interesse. COOKE (1991) e AYYUB (2001) apresentam métodos com este objetivo.

Devido à disponibilidade de tempo dos engenheiros responsáveis pelo sistema, foi utilizado o método de educação direta do especialista, apresentado em COOKE (1991), o qual possui custo bem menor para a educação.

Tabela 4-15 – Probabilidade de obtenção de um equipamento voltar tão bom quanto novo

EQUIPAMENTO	q
COAGULAÇÃO	0,8
PENEIRA	0,82
DESAGUADORA	0,9
SECADORA	0,8
TRANSP HORINZONTAL (HOT BOX)	0,9
TRANSP VERTICAL (SPYRAL)	0,5
MOINHO	0,7
ESTEIRA ALPHA	0,72
ESTEIRA BETA	0,74
PRENSA 1	0,72
PRENSA 2	0,7
EMBALADEIRA	0,8

4.4.3.4. Taxas de Falhas

Através da análise do gráfico do número de falhas pelo tempo total de operação, deve-se verificar se os tempos entre falhas apresentam uma tendência. Se o gráfico possuir o aspecto de uma curva côncava ter-se-á indicações da existência de tendência de melhoria, pois os tempos entre falhas tendem a aumentar ao longo do tempo de missão. Por outro lado, uma curva convexa indica degradação, enquanto que uma curva aproximadamente linear indica que não existe tendência nos dados, i.e., as funções intensidades são constantes (RIGDON (2000)).

Tabela 4-16 – Média por subsistema e sua respectiva taxa de falha

Subsistema	MTBF	ROCOF
Peneira	509,3	0,001963294
Máquina Desaguadora	261,18	0,0038
Maquina Secadora	198,38	$\frac{1,92}{163,42} \left(\frac{t}{163,42} \right)^{1,92-1}$
Transportador Horizontal (Hot Box)	320,8	0,00311
Transportador Vertical (Spyral)	67,6	0,014799
Moinho	238,2	$\frac{2,37}{212,64} \left(\frac{t}{212,64} \right)^{2,37-1}$
Esteira Alpha	244,5	$\frac{1,85}{490,21} \left(\frac{t}{490,21} \right)^{1,85-1}$
Esteira Beta	228,2	0,004383
Prensa 1	213,6	0,0047
Prensa 2	125,2	$\frac{1,17927}{265,3376} \left(\frac{t}{265,3376} \right)^{1,17927-1}$
Embaladeira	350,6	0,0028
Sistema de Coagulação	450,1579	0,00223

4.4.3.5. Análise da Confiabilidade

Foi realizada uma análise da confiabilidade de cada equipamento utilizando as taxas de falhas desenvolvidas na seção 4.4.3.4. Foi considerado um tempo de missão de 48 horas (2 dias). Segundo a Tabela 4-17, foi verificada a baixa confiabilidade dos equipamentos, sendo o equipamento Spyral apresentou a menor confiabilidade.

Tabela 4-17 – Confiabilidade por componente para um tempo de missão de dois dias.

EQUIPAMENTO	R(MISSÃO)
ESTREIRA ALPHA	98,00%

MOINHO	97,00%
PENEIRA	91,01%
SECADORA	91,00%
COAGULADOR	89,84%
PRENSA 2	88,00%
EMBALADEIRA	87,42%
HOT BOX	86,10%
DESAGUADORA	83,33%
ESTEIRA BETA	81,00%
PRENSA 1	79,80%
SPYRAL	49,15%

A confiabilidade do sistema sem qualquer tipo de manutenção para um tempo de missão de dois dias foi obtida:

$$R_s(48) = 17,2\%$$

4.5. Obtenção de uma política de manutenção ótima

O tempo de missão determinado foi de 48 horas, o mesmo selecionado para se obter a confiabilidade dos componentes e do sistema. Os intervalos foram a cada 4,8 horas para verificação do sistema se há necessidade de fazer manutenção preventiva ou não, resultando em 16 verificações por componente. Segue abaixo a política ótima de manutenção para um tempo de missão de 48 horas.

Tabela 4-18 – Resultados da simulação com o algoritmo desenvolvido

Componente	Realizar manutenção preventiva no tempo em horas:
Peneira	35
Desaguadora	30
Secadora	Não Realizar manutenção
<i>Hot – Box</i>	10; 20; 45,
<i>Spyral</i>	15; 40
Moinho	Não Realizar manutenção
Embaladeira	25,40;
Coaguladores	10; 20;
Esteira Alpha	10; 25; 35
Esteira Beta	15;20
Prensa 1	40;
Prensa 2	30; 45;

A confiabilidade condicionada ao reparo por componente, sujeito a política de manutenção sugerida acima, para o sistema (48 horas) é mostrada nas figuras abaixo:

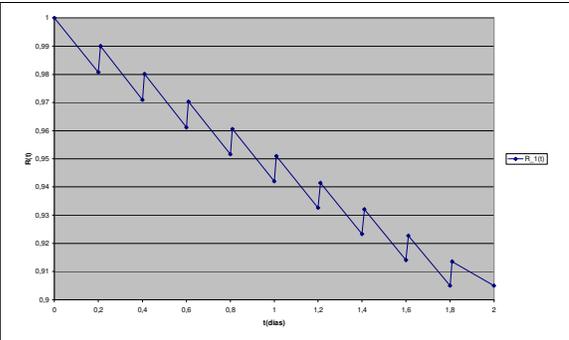


Figura 4-15 - Peneira

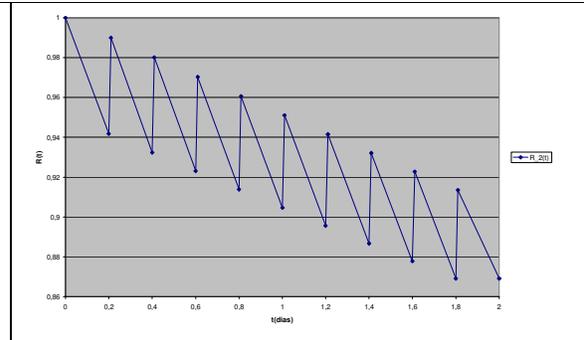


Figura 4-16 - Desaguadora

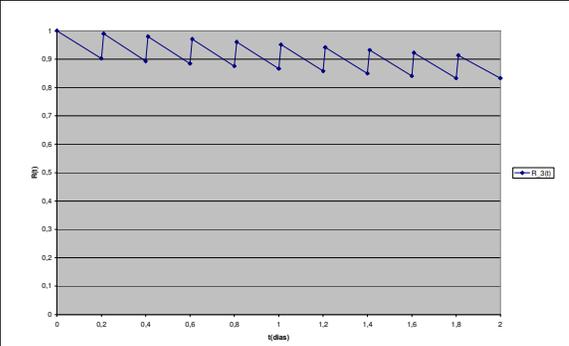


Figura 4-17 - Secadora

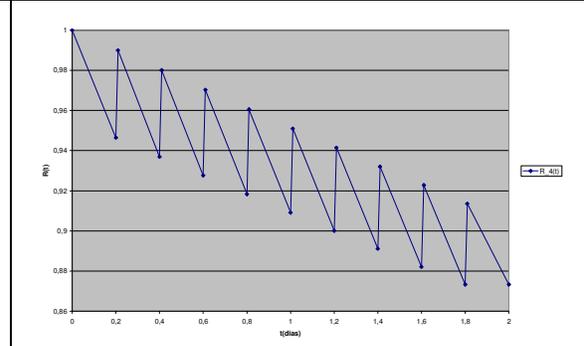


Figura 4-18 - Hot box

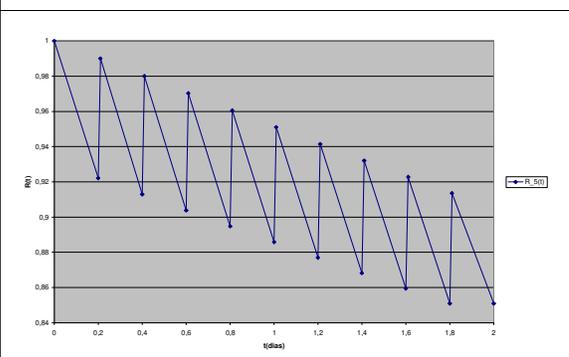


Figura 4-19 - Spyral

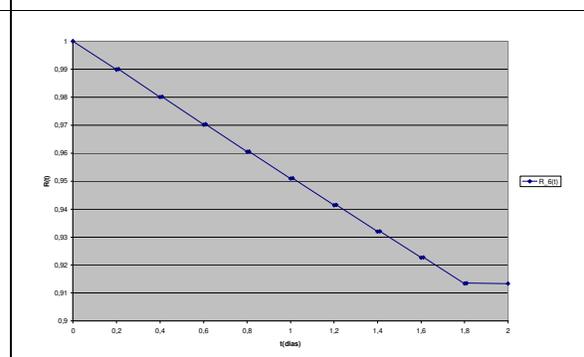


Figura 4-20- Moinho

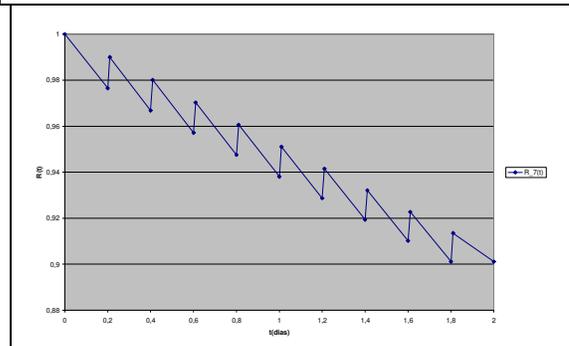


Figura 4-21 - Esteira Alpha

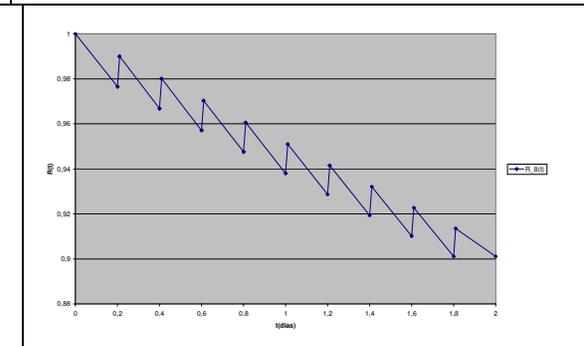
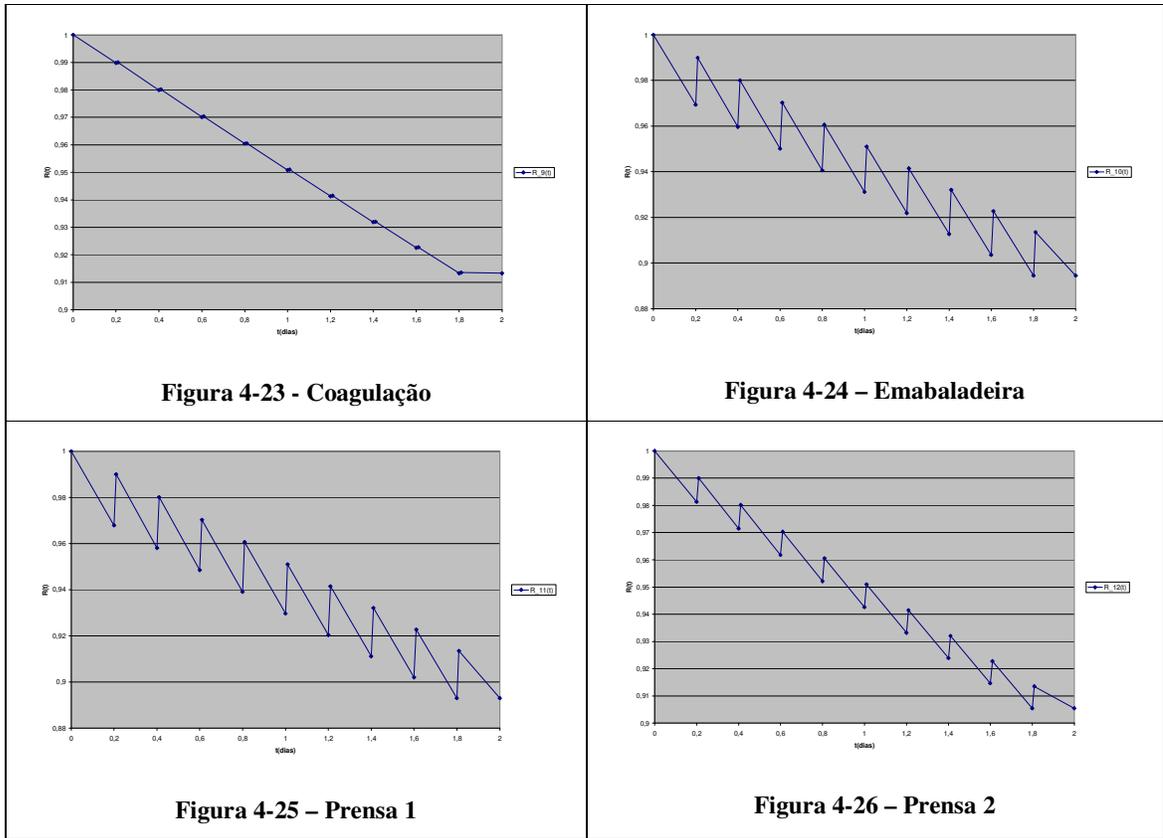
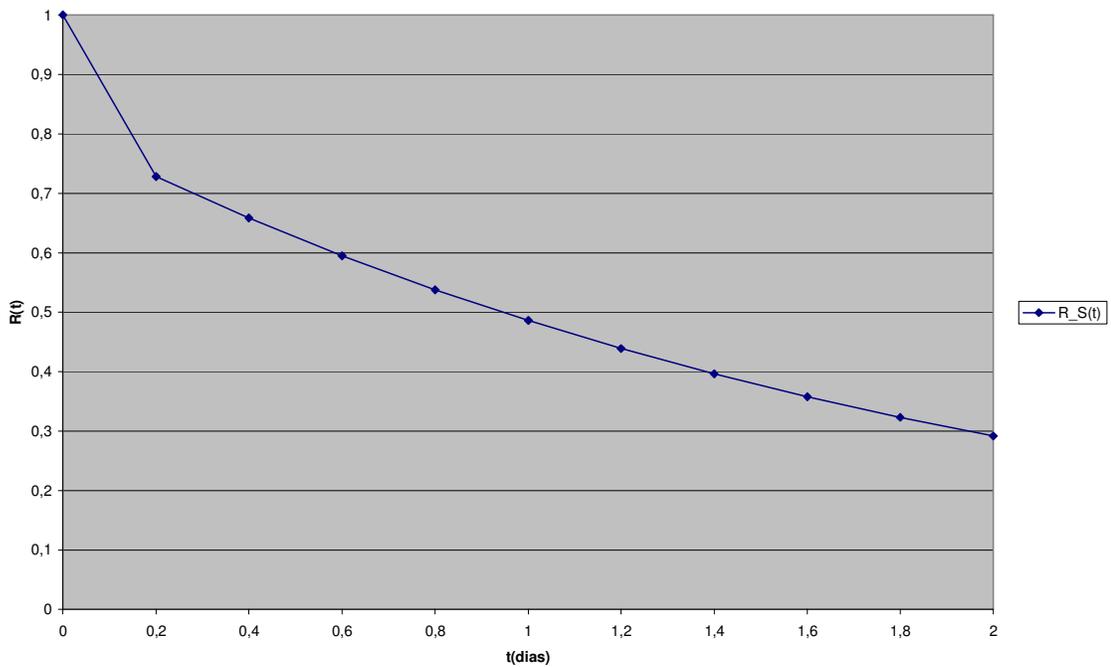


Figura 4-22 - Esteira Beta



Abaixo segue a confiabilidade do sistema sujeito ao reparo, tendo a política de manutenção sugerido na Tabela 4-19:



A confiabilidade para um tempo de missão de 48 horas sujeita ao reparo foi de 33,3 %, maior do que a confiabilidade do sistema sujeito a nenhum reparo, que foi de 17 %. Esse resultado confirma o que foi mostrado nos exemplos do capítulo 3, onde a manutenção preventiva sugerida pelo modelo aumenta a confiabilidade do sistema em relação à escolha de não fazer manutenção preventiva.

A política de manutenção acima resultou em um custo total esperado de manutenção no período de R\$ 1.075,87. Esse valor esperado referente ao tempo de missão, mostrou-se abaixo do realizado atualmente no exemplo de aplicação, levando em consideração que a política de manutenção encontrada difere da política usada atualmente na linha do exemplo. A atual política adotada pelo exemplo é realizar apenas uma manutenção preventiva a cada 30 dias. Nos demais dias, a linha fica sujeita às possíveis manutenções corretivas.

De acordo com a política de manutenção sugerida pelo modelo, os tempos para realizar manutenção preventiva estão muito próximos ou até mesmo iguais, como o *Spyral* ($t=40$) e a Prensa 1 ($t=40$), que é um ponto positivo, pois pode-se aproximar um tempo em comum para realizar manutenções preventivas em todos os ativos, deixando a linha indisponível em apenas um momento. Porém, para realizar manutenção preventiva em todo o processo produtivo nesse tempo em comum, faz-se necessário uma grande quantidade de recursos (Mecânicos, instrumentistas, eletricitas etc), onde atualmente os mesmos não estão disponíveis, devido ao fato de existirem outras áreas na empresa que necessitam de manutenção. Pela Tabela 4-19, poderia existir uma aproximação, e se realizar uma manutenção preventiva a cada 30 horas, mesmo assim, seriam 24 intervenções em apenas 30 dias. Pelo histórico do exemplo de aplicação se teria que alocar todo o recurso de manutenção 24 vezes por mês em apenas uma área. Conseqüentemente essa ação reduziria a disponibilidade de outras áreas.

Outra restrição em relação ao tempo próximo para realizar manutenção nos equipamentos é devido à já mencionada peculiaridade no sistema, onde quando ocorre uma parada na linha, a mesma só poderá voltar a funcionar depois de 0,5 hora. Isso ocorre devido à proteção dos motores de alta potência (1500 HP), evitando a ocorrência de acidentes na linha de produção. Então verificando os equipamentos: Hot Box, Esteira Alpha e Esteira Beta, na Tabela 4-19 se teriam quatro manutenções de no mínimo 0,5 hora cada em apenas um dia. Isso geraria um tempo de 2 horas apenas para realizar manutenção preventiva. Porém, pode-se aproximar um tempo em comum para realizar esses reparos, apesar de não eliminar a restrição da política, como já mencionado acima.

Outra restrição para aplicação dessa política, ainda utilizando o Hot Box como exemplo, é que a equipe de manutenção só trabalha no horário Administrativo (08h às 17h),

porém as manutenções preventivas no equipamento *Hot Box* devem ser realizadas em 10 e 20 horas de operação, gerando assim aumento de custo de transporte para enviar a equipe fora do horário, como também a geração de hora extra para a equipe que irá realizar a manutenção. Pode-se somar a isso a perda de produção cessante no período que a linha ficará indisponível. Essa restrição em relação ao horário de trabalho da manutenção, gerando horas extras, não está inserida no modelo, podendo ser avaliada para trabalho futuros.

Um possível motivo dessa necessidade de realizar manutenção preventiva em pequenos intervalos está nas elevadas taxas de falhas encontradas para cada componente. Esses valores podem ser influenciados por diversos fatores como: Falha de registros de paradas, baixa qualidade dos serviços de manutenção, baixa qualidade das peças sobressalentes, faltas de peças sobressalentes, falhas no projeto do ativo, falta de programação para realizar os serviços preventivos, falha na montagem do ativo etc. Para eliminar essa restrição do intervalo de tempo, deve-se avaliar as possíveis causas que geraram essas elevadas taxas de falha e sugerir possíveis soluções para aumentar a taxa de falha dos itens. Com a redução dos valores das taxas de falha, o espaço entre manutenções preventivas possivelmente aumentará, viabilizando a política de manutenção sugerida pelo modelo. Abaixo segue observações que podem influenciar a redução desses valores.

Falta de registro de paradas

Foi verificado no exemplo aplicado, um banco de dados incompleto, onde o mesmo falta informações importantes para melhorar a eficiência da manutenção. Um exemplo de falta de informação é falta de registro da “causa provável de falha do ativo”. O software que captura essas informações apenas informa qual ativo ficou indisponível, mas não o motivo provável que gerou esta indisponibilidade.

Recomenda-se que se faça o registro das ocorrências e motivos das paradas para os estudos de engenharia de manutenção e para uma perfeita identificação de responsabilidades, devendo levar em conta os seguintes aspectos básicos:

1. Localização da ocorrência;
2. Modalidade interveniente (Instrumentação, mecânica, caldeiraria e elétrica);
3. Causa provável de falha;
4. Mão-de-obra envolvida;
5. Data e horário de parada;
6. Ordens de Serviços a executar;

Com essas informações se poderá alimentar um banco de dados, do qual se poderá obter métricas de confiabilidade e manutenção, podendo assim a equipe de engenharia de

manutenção e projetos aprimorar seu planejamento dos serviços, verificar quais áreas de manutenção (Instrumentação, mecânica, elétrica) que apresentam maiores limitações, reduzir o tempo de reparo, aumentar a eficiência dos projetos, melhorar a eficiência da alocação de serviços por área de manutenção, etc.

Baixa Qualidade dos serviços de manutenção

Outro ponto a ser considerado, para explicar a baixa confiabilidade, é o fato de que as equipes de manutenção preventiva destinada a cada equipamento possuem índices que medem sua qualidade de manutenção. De acordo com métodos de educação direto, um levantamento de probabilidades foi feito para cada equipe de manutenção. Conforme visto na Tabela 4-15, essas probabilidades indicaram baixa chance de determinadas equipes de manutenção executar uma manutenção que o equipamento volte tão bom quanto novo. No exemplo de aplicação, pode-se destacar dois motivos para essa baixa qualidade do serviço:

- Falta de uma gestão eficiente das peças sobressalentes: Foi considerado no modelo que, em equipamentos não reparáveis, a ocorrência das falhas implicam que o equipamento seja completamente substituído por um novo em seu lugar. Isso é diferente do que ocorre na realidade em um ambiente fabril, pois devido à falha na programação de compras e da logística de peças, não é sempre que se têm peças sobressalentes disponíveis para trocá-los. Um exemplo pode ser encontrado na embaladeira, onde existe uma peça de corte, cuja função é cortar o filme que embala os fardos de borracha. Por se tratar de uma peça importada com tempo longo de chegada e liberação, a mesma deveria ser considerada como item crítico e estar presente em estoque de manutenção. Porém, foi verificado nesse trabalho que a peça nem estava cadastrada no sistema, ocorrendo a compra apenas quando a mesma apresentava falha, ocasionando o uso de uma peça nacional, similar a importada, porém com maior taxa de falha. Por se tratar de um sistema com vários equipamentos importadas, essa restrição pode se estender para vários equipamentos da linha, ocorrendo assim a elevadas taxas de falhas dos itens. Deve-se aprimorar a sistemática de compra de peças sobressalentes, através de um sistema de informação integrado, como vários existentes atualmente no mercado, evitando assim a utilização de peças não especificadas;
- Baixa Qualificação da Mão de obra: Foi verificada a baixa de qualidade de alguns membros da equipe da manutenção. Um exemplo encontrado foi na equipe de mecânica, onde alguns profissionais não tinham curso técnico de

mecânica. Essas pessoas trabalharam anos como auxiliares de mecânicos e com serviços de calderaria e foram promovidos sem nenhum treinamento por terem acumulado tempo de serviço. Uma proposta seria treinar/qualificar essas pessoas em parcerias com instituições especializadas como Escolas Técnicas e Escolas especializadas;

Falta de Planejamento nos trabalhos de manutenção

Foi verificado no exemplo de aplicação uma falta de planejamento para realizar manutenção dos serviços. O planejamento das atividades de manutenção deve começar antes mesmo da instalação dos equipamentos. Baseado nas informações do fabricante do equipamento e experiência dos profissionais de manutenção da empresa define-se qual a melhor política possível de ser adotada para as manutenções periódicas. Após início de funcionamento dos equipamentos, deve-se acompanhar o sistema para capturar informações do mesmo, somando com os dados citados acima, o que não foi visto na linha de produção do exemplo. Nessa linha, após a entrada em operação do equipamento, não se tem estabelecido meios de acompanhamento e controle de seu funcionamento, tais como indicadores de taxa de falha e custos por intervenção corretiva / preventiva. Devido a isso, deve-se estabelecer meios para viabilizar o acompanhamentos dos equipamentos através de inspeções de rota planejadas, utilizando-se de “*check-list*”. Estas atividades devem ser planejadas de forma que se tenha o envolvimento de todos os profissionais da empresa como agentes de manutenção e conservação. Aos operadores cabem as inspeções e atividades de limpeza que são realizadas diariamente.

Aos mantenedores e inspetores de equipamento são relacionadas as atividades que exigem uma habilidade técnica maior e uma visão mais analítica das condições de operação do equipamento, estas atividades podem ser planejadas para uma periodicidade semanal ou quinzenal. Para a linha de produção de elastômeros, outras atividades que devem ser planejadas preventivamente de forma periódica são as lubrificações, calibração dos instrumentos de processo e a limpeza dos equipamentos e componentes.

Com essa rotina de inspeção, serão capturados dados para a manutenção prever a cronologia do desenvolvimento das atividades de manutenção e otimizar a utilização dos recursos necessários, sincronizando as atividades e seus respectivos profissionais.

Além do motivos citados acima, outro ponto que deve ser considerado é ao fato de que o sistema está praticamente em série (Figura 4-9), isso faz com que a linha apresente uma baixa

confiabilidade ao final da realização do tempo de missão determinado, pois a parada de apenas um equipamento pode parar toda a linha produtiva.

Falha na montagem de Equipamentos

Conforme visto na Tabela 4-17, os valores de confiabilidade se apresentaram baixo em um tempo de missão de 48 horas. Alguns fatores já citados acima podem provocar esses elevados numero de falhas por equipamento. Porém o equipamento Spyril, que obteve a menor confiabilidade no tempo de missão de 48 horas, tem um diferencial em relação aos demais equipamentos. Na sua instalação ocorreu uma falha de montagem, fazendo com que seu movimento rotativo não ficasse uniforme ao longo do equipamento. Devido a isso, esse equipamento apresenta o menor tempo entre falhas da linha, igual a 63 horas (Ver Tabela 4-16). Como o sistema é praticamente em sério, o Spyril gera paradas em todo o sistema produtivo e consumo os maiores recursos de manutenção para realizar manutenção corretiva. De acordo com os especialistas (Engenheiros, Técnicos, fornecedores do equipamento), a única solução para reduzir o número de pardas é substituir o equipamento pelo um novo.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A forma adotada para expor as conclusões deste trabalho está organizada de acordo com os objetivos traçados, os quais são confrontados com o que foi realizado. Posteriormente são propostos alguns desafios futuros para pesquisas sobre o tema. Mas, antes, será realizado um resumo dos temas abordados nesta dissertação.

Em princípio, no Capítulo 2, a fim de facilitar a compreensão do leitor sobre o que é tratado nesta dissertação, foram expostos alguns conceitos básicos necessários a compreensão do que é discutido nesta dissertação. Foram expostos conceitos relacionados a engenharia de confiabilidade, processos estocásticos, técnicas de simulação e algoritmos genéticos, que são a base fundamental para utilização do modelo proposto.

Após a fundamentação teórica, o capítulo 3 abordou o desenvolvimento do modelo proposto, onde o principal objetivo é otimizar o custo de manutenção de sistemas. Para atingir esse objetivo, o modelo utilizou a abordagem de otimizar o tempo entre manutenções preventivas, baseado no mínimo custo. A técnica de otimização utilizada foi algoritmo genético, que faz uma analogia a teoria da evolução de Darwin, onde as espécies evoluem pelo princípio da seleção natural e sobrevivência dos indivíduos mais aptos. Ainda em relação ao modelo, nesse capítulo foi exposto o método para obtenção do número esperado de falhas, que foi obtido através do método da inversão.

No capítulo 4, a metodologia foi aplicada em um estudo de caso. Comentários sobre os resultados da aplicação do modelo serão realizados na seção 4.4.3.5.

5.1.1. Modelo proposto

O desenvolvimento de uma metodologia para otimizar o custo de manutenção foi a principal motivação do presente trabalho. A metodologia foi fundamentada na integração entre diagrama de blocos e algoritmos genéticos. Os AG's são apropriados para problemas de otimização complexos, que envolvem muitas variáveis e um espaço de soluções de dimensão elevada.

Com os dados de funcionamento e falha dos equipamentos, desenvolveu-se um diagrama de blocos, onde as funções de intensidade de falha variam no tempo. As taxas de falha, por sua vez, foram estimadas a partir de uma base de dados, resultado em distribuições

exponencial e Weibull. Com estas informações, foram estimados a confiabilidade para cada equipamento, como também para todo o sistema. O valor estimado para confiabilidade do sistema foi considerado baixo, o resultado pode ser visto em detalhes na seção 4.4.3.5.

O método de elicitação direta que foi aplicado para avaliar a qualidade da manutenção tem algumas limitações, devido ao fato de muitas pessoas não terem conhecimento básico de probabilidade. uma sugestão para sanar essa deficiência para trabalho futuros será visto na Seção 5.2

Para a consecução do presente trabalho, foi necessário o desenvolvimento de métodos numéricos para aplicação do algoritmo genético, definidos a partir de métricas de confiabilidade e a evolução de indivíduos a cada iteração, assim como a sua implementação em linguagem computacional. Conforme visto no exemplo na Seção 3, o modelo se apresentou válido, pois com taxas de falhas maiores, o custo de manutenção aumentou significativamente, devido ao maior número de reparos.

5.1.2. Resultados do Exemplo de Aplicação

Observou-se na produção de elastômero um promissor campo de aplicação para a metodologia proposta. As paradas para manutenção em geral nesse setor apresentam enormes perdas financeiras. Essas paradas são constantemente monitoradas, sendo todas elas registradas e armazenadas, viabilizando o exemplo de aplicação. Os dados foram coletados num período de 24 meses, e dizem respeito às falhas que ocorreram nos equipamentos constituintes do sistema de produção de Elastômeros.

Através das informações sobre o sistema foi montando um diagrama de blocos do sistema de produção de Elastômero, como também foi obtido métricas de confiabilidade como taxa de falha por equipamento. A confiabilidade do sistema sujeito a reparos para um tempo de missão de 48 horas foi de 33 %, maior que a confiabilidade sujeito a nenhum reparo, 17%.

Devido às altas taxas de falha dos equipamentos, a política de manutenção sujeito a reparo apresentou algumas restrições para ser aplicado no exemplo de aplicação. Os tempos para realizar manutenção preventiva estão muito próximos ou até mesmo iguais, como o *Spyral* ($t= 40$) e a *Prensa 1* ($t= 40$), que é um ponto positivo, pois pode-se aproximar um tempo em comum para realizar manutenção preventiva em todos os ativos, deixando a linha indisponível em apenas um momento. Porém, para realizar manutenção preventiva em todo o processo produtivo nesse tempo em comum, faz-se necessário uma grande quantidade de recursos (Mecânicos, instrumentistas, eletricitas etc), onde atualmente não estão disponíveis, devido ao fato de existirem outras áreas na empresa que necessitam de manutenção.

Um possível motivo dessa necessidade de realizar manutenção preventiva em pequenos intervalos está nas elevadas taxas de falhas encontradas para cada componente. Esses valores podem ser influenciados por diversos fatores como: Falha de registros de paradas, baixa qualidade dos serviços de manutenção, baixa qualidade das peças sobressalentes, faltas de peças sobressalentes, falhas no projeto do ativo, falta de programação para realizar os serviços preventivos, falha na montagem do ativo etc.

Os desafios e sugestões de trabalhos futuros serão apresentados e comentados na próxima seção.

5.2. SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se a inclusão do conceito de Processo de Renovação Generalizado no modelo proposto. Dentre as hipóteses mais comumente utilizadas na análise de Confiabilidade de sistemas está a de reparo perfeito ou ideal, i.e., o sistema é retornado a uma condição de “tão bom quanto novo” após uma operação de reparo. Esta é uma suposição que pode ser utilizada para alguns sistemas não-reparáveis, i.e., sistemas para os quais a operação de reparo consiste na completa substituição dos mesmos. Tais sistemas podem ser modelados a partir de um processo de Renovação (PR), no qual os tempos entre falhas são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas por uma distribuição de probabilidade arbitrária não necessariamente exponencial.

No extremo oposto ao reparo perfeito existe a hipótese de reparo mínimo, i.e., a ação de reparo recupera o sistema falho a uma condição que o mesmo possuía imediatamente antes da falha. O objetivo do reparo mínimo é apenas retornar o equipamento à operação, não melhorar seu desempenho. Esta é uma hipótese que na maioria das vezes não acontece na prática, já que uma ação de reparo tem o intuito de melhorar o desempenho do sistema em relação ao que o mesmo possuía antes de falhar. Uma ação de reparo mínimo pode ser modelada por um Processo Não Homogêneo de Poisson (PNHP). Para maiores detalhes sobre PR ou PNHP veja ROSS (1997).

Na maioria das vezes, entretanto, uma ação de reparo recupera um sistema falho a uma condição intermediária entre um reparo perfeito e um reparo mínimo, o que é denominado reparo imperfeito. De certa forma, o reparo imperfeito pode ser entendido como um tipo de reparo geral que possui como extremos os reparos perfeito e mínimo. Existe uma vasta literatura sobre métodos de tratamento e aplicações de ações de reparo imperfeito: CHUKOVA et al. (2004), por exemplo, apresentam um método para modelar reparos imperfeitos na análise de tempos de garantia; YAÑEZ et al. (2002) apresentam o modelo

probabilístico de tratamento de reparo imperfeito conhecido como Processo de Renovação Generalizado (PRG); MOURA et al. (2006)) utilizam conceitos do PRG para avaliar o grau de eficácia de equipes de manutenção de uma indústria de componentes automotivos; DOYEN et al. (2004) apresentam classes de modelos em reparo imperfeito baseados na redução que ações de reparo proporcionam na idade virtual ou na intensidade de falha de dado sistema; PHAM et al. (1996;) apresentam uma vasta revisão da literatura que reúne cerca de quarenta métodos de tratamento de reparo imperfeito.

É necessário definir os conceitos de idade virtual e real para o completo entendimento do PRG. Considere um sistema com os seguintes tempos entre falhas: T_1, T_2, \dots, T_n :

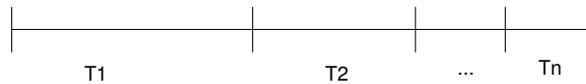


Figura 5-1 – Tempo entre Falhas

Supondo que os tempos de reparo são desprezíveis em relação ao tempo que o sistema permanece operacional, a vida real R_n deste sistema é calculada como o somatório dos tempos entre falhas T_i , i.e.:

$$R_n = \sum_{i=1}^n T_i, \quad \text{Equação 5-1}$$

onde n é o número de tempos entre falhas.

Já a idade virtual V_n é definida como a idade calculada do equipamento após a n-ésima ação de reparo, i.e.,

$$V_n = q \sum_{i=1}^n T_i = qR_n, \quad \text{Equação 5-2}$$

onde q é definido como o parâmetro que estima a qualidade das ações de reparo sobre determinado sistema. Basicamente, se $q = 0$ o reparo é perfeito no sentido que sempre retorna o sistema para uma situação exatamente como era quando novo em $t=0$, i.e., “tão bom quanto novo”; se $q = 1$, o reparo é dito mínimo já que retorna o sistema para uma condição exatamente igual a que o mesmo possuía antes de falhar, i.e., “tão ruim quanto velho”; e se $0 < q < 1$, o reparo é dito imperfeito uma vez que o sistema após o reparo terá um desempenho intermediário aos reparos perfeito e mínimo, i.e., “pior do que novo, mas melhor do que velho”.

Então, a idéia é que o parâmetro de rejuvenescimento q seja utilizado para estimar a qualidade de uma ação de manutenção. Na verdade, a confiabilidade do sistema deixaria de ser influenciada diretamente pela probabilidade p da manutenção ser realizada de forma satisfatória e passaria a ser uma função da idade virtual do sistema. A motivação para isso é

que existem na literatura relacionada trabalhos que mostram grande adequação dos dados de falha aos parâmetros estimados do PRG, como em YAÑEZ, JOGLAR et al. (2002). Além disso, mesmo quando dados de falha são escassos a estimação do parâmetro q do PRG ainda continua viável a partir da utilização do paradigma Bayesiano, como ROCHA (2006)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYYUB, B. M. *Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks*. New York: CRC Press, 2001

BACK, T. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*. Oxford University Press: 1996

BARBETTA, P. A. R., M. M.; BORNIA, A. C. *Estatística para cursos de engenharia e informática*. São Paulo: Atlas, 2004

BEASLEY, D., BULL, D. e MARTIN, R. (1993). *An overview of genetic algorithms: Part I, fundamentals*, Inter-University Commite on Computing.

BLACHE, K. M. S. "Defining Failure of Manufacturing Machinery & Equipament." n *Proc. Annual Reliability and Maintainability Symp A.B.- I.*, p.69-75.,1994

BURGAZZI, L. and P. PIERINI. "Reliability studies of a high-power proton accelerator for accelerator-driven system applications for nuclear waste transmutation." *Reliability Engineering and System Safety* 92 449–463,2007

Busacca PG, M. M., Zio E. "Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems." *Reliab Eng Syst Saf* 72, 1: 59-74,2001

CARRIER, C. (2006). *Transportadores Vibratórios/ Visão Geral*.

CHIANG JH, Y. J. "Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection." *Reliab Eng Syst Saf* 71, 165-172,2001

Chukova, S., R. Arnold and D. Q. Wang. "Warranty analysis: An approach to modeling imperfect repairs." *International Journal of Production Economics* 89, 54-68 2004

COOKE, R. *Experts in Uncertainty: Opinion and subjective probability in science*. New York: Oxford University Press, 1991

CROWDER, M. J. *Statistical Analysis of Reliability Data*. London: Chapman & Hall, 1991

DOYEN, L. and O. GAUDOIN. "Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age." *Reliability Engineering and System Safety* 84, 45-56,2004

FIRMINO, P. R. "Redes Bayesianas para parametrização da confiabilidade em sistemas complexos." *Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia e Geociências* 2004

French Oil, C. (2006). *Polymer Equipament*.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*.Addison-Wesley Pub. Co., 1989

GUO, H. and X. Yang. "A simple reliability block diagram method for safety integrity verification." *Reliability Engineering and System Safety* 92, 1267-1273,2007

HARIK G., C.-P. E., GOLDBERG D. E. and MILLER L.B. "The Gambler's Ruin Problem, Genetic Algorithms, and the Sizing of Populations." *Evol. Comput.* Vol.7, No 3: pp 231-255,1999

Hilsmeier, T. A. e. T. V., WE. . "Time-dependent unavailability of aging standby components based on nuclear plant data." *Reliab Eng Syst Saf* 47, 199–205.,1995

HOLLAND, J. H. "Adaptation in Natural and Artificial Systems." 1975

HUE, X. "Genetic Algorithms for Optimization: Background and Applications. Edinburgh Parallel Computing." 1997

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*.Rio de Janeiro: QualityMark: Petrobras, 2001

LAPA, C. M. F., C. M. N. A. PEREIRA and M. A.C.A. (1999). *Aplicação de algoritmos genéticos na otimização da política de manutenções preventivas de um sistema nuclear centrada em confiabilidade*. Proceedings of the 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Águas de Lindóia, Brazil.

LAPA, C. M. F., C. M. N. A. PEREIRA and M. A.C.A. "Maximization of a Nuclear System Availability through Maintenance Scheduling Optimization Using Genetic Algorithm, Nuclear Engineering and Design." *Reliability Engineering and System Safety* 196, 95-107,2000

LAPA, C. M. F., C. M. N. A. PEREIRA and M. P. BARROS. "A model for Preventive Maintenance Planning by Genetic Algorithm Based in Cost and Reliability." *Reliability Engineering and System Safety*. 2005

LEWIS, E. E. *Introduction to Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1987

MARSEGUERRA M., Z. E., MARTORREL S. "Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications." *Reliability Engineering and System Safety* Vol. 91, pp 977-991, 2006

MARSEGUERRA, M. Z., E. MARTORELL S. "Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications." *Reliability Engineering and System Safety* 91, 977-991, 2006

MENEZES, R. C. S. "Uma metodologia para avaliação da confiabilidade humano em atividades de substituição de cadeias de isoladores em linhas de transição." *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção* 2005

MICHALEWICZ, Z. *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*. New York: 1996

MIRICA, C. P. *Processo Básico em tecnologia de elastômeros*. Brasília 1995

MITCHELL, M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MIT Press, 1996

MODARRES, M. K., M. & KRIVSTOV, V. *Reliability Engineering and Risk Analysis*. New York: Marcel Dekker, 1999

MOUBRAY, J. *Reliability Centred Maintenance*. Butterworth Heinemann, 1991

MOURA, M. C. and E. L. Droguett (2006). *Determinação do nível de eficácia de equipes de manutenção via Processo de Renovação Generalizado*,. XXVI ENEGEP, Fortaleza, CE, Brasil.

MOURA, M. J. C. "Processos semi markovianos e redes bayesianas para avaliação de indicadores de desempenho de confiabilidade de sistemas complexos tolerantes à falha. *Dissertação (Mestrado)* " *Engenharia de Produção* 2006

MUÑOZ A, M. S., SERRADELL V. "Genetic Algorithms in Optimizing Surveillance and Maintenance of Components." *Reliab Eng Syst Saf* 57, 2: 107-120, 1997

PHAM, H. and H. WANG. "*Imperfect maintenance.*" *European Journal of Operational Research* 94, 425-438.,1996;

RAUSAND, M. O., K. "*The basic concepts of failures analysis.*" *Reliability Engineering and System Safety* vol. 53, p. 73-83,1996

RIGDON, S. E. B., A. P. *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems.*New York: John Wiley & Sons, 2000

ROCHA, S., P. V. "*Um Modelo Integrado de Inferência Bayesiana e Processos Markovianos para Análise de sistema Reparáveis sujeitos a Reparo Imperfeito via Processo de Renovação Generalizada.*" *Engenharia de Produção* 2006

ROSS, S. M. *Simulation.*2. ed. USA: Academic Press, 1997

ROSS, S. M. *Introduction probability models.* New York: 2000

SHERWIN, D. J. "*A review of overall models for maintenance management.*" *Journal of Quality in Maintenance* 6, pp. 138 – 164,2000

SMITH, A. M. *Reliability-Centred Maintenance.*New York: 1993

VAN NOORTWIJK, J., j. DEKKER and T. MAZZUCHI. "*Expert judgment in maintenance optimization.*" *IEEE Trans Reliab* 41, 427–432.,1992

YAÑEZ, M., F. JOGLAR and M. MODARRES. "*Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience.*" *Reliability Engineering & System Safety* 77, 167-180.: 2002

ZITZLER, E. "*Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: methods and applications.*" *Swiss Federal Institute ofTechnology* 1999.

