

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

SÉRGIO PIRES DIAS

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE, MANTENIBILIDADE E
DISPONIBILIDADE EM UM SISTEMA DE PELOTAMENTO DE
MINÉRIO DE FERRO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2019

SÉRGIO PIRES DIAS

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE, MANTENIBILIDADE E
DISPONIBILIDADE EM UM SISTEMA DE PELOTAMENTO DE
MINÉRIO DE FERRO**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

CURITIBA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE, MANTENIBILIDADE E DISPONIBILIDADE EM UM SISTEMA DE PELOTAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

por

SÉRGIO PIRES DIAS

Esta monografia foi apresentada em 04 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Wanderson Stael Paris MSc. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho e aos valorosos colegas de profissão que influenciaram no resultado.

RESUMO

DIAS, Sérgio P. Análise de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade em um sistema de pelotamento de minério de ferro. 2019. 69 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Este trabalho propõe a realização de uma análise RAM em um sistema de pelotamento de minério de ferro em uma usina de pelotização. Esta análise será feita utilizando-se dados históricos de tempos entre manifestações de falhas dos componentes do sistema. O sistema será modelado através de um RBD (*Reliability Block Diagram*) e será realizada a análise RAM do mesmo. Conclusões acerca dos componentes mais críticos e que mais impactam a disponibilidade serão obtidas. Além dos indicadores convencionais obtidos através da análise RAM, um indicador específico para o sistema em questão será calculado, trata-se da “disponibilidade ponderada” a qual é uma métrica de disponibilidade que leva em consideração a capacidade de produção do sistema. Por fim, os indicadores obtidos na análise RAM serão comparados com resultados reais de operação da linha, para que o modelo possa ser aferido.

Palavras-chave: RAM. LDA. Disponibilidade. Pelotização.

ABSTRACT

DIAS, Sérgio P. Reliability, Availability and Maintainability Analysis of an iron ore balling disc system. 2019. 69 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

This job aims to perform a RAM analysis in an iron ore balling disc system inside an iron ore pelletizing plant site. This analysis will be based on historical data of the time between failures of the system's components. The system will be modeled using RBD (*Reliability Block Diagram*) and a RAM analysis will be performed. This analysis will reveal the most critical assets and the ones that most affect the system's availability. In addition to conventional indicators obtained with RAM analysis, a particular indicator for the studied system called "*adjusted availability*" will be calculated. This indicator is related to the availability of the system when the production throughput is taken into account. Finally, the indicators obtained with RAM analysis will be compared with real results taken from historical operational data of the balling disc system so the model can be calibrated.

Key words: RAM. LDA. Availability. Pelletizing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1.1 - Esquemático de um disco de pelotamento de minério de ferro	15
Figura 1.1.2– Histórico de disponibilidade ponderada da linha de pelotamento	16
Figura 1.1.3 – Etapas para realização da análise RAM	18
Figura 2.1 - SIPOC do processo de pelotamento de minério de ferro.....	19
Figura 2.2 - Representação do sistema de pelotamento e suas linhas de	20
Figura 2.3 - Representação de uma linha de pelotamento.....	20
Figura 2.4 - Representação de um disco de pelotamento	22
Figura 2.5 - Exemplos de disco de pelotamento reais.....	22
Figura 2.6 - Exemplo de classificador de rolos.....	23
Figura 2.7 - Exemplo de correia transportadora	24
Figura 3.1 - Exemplo de uma PDF	28
Figura 3.2 - Exemplo de uma CDF.....	29
Figura 3.3 - PDF para sucesso/insucesso de funcionamento	30
Figura 3.4 - Exemplo de um RBD.....	31
Figura 3.5 - Blocos em Configuração Série.....	31
Figura 3.6 - Blocos em configuração paralela	32
Figura 3.7 - Blocos em configuração K/N.....	32
Figura 3.8 - Blocos em configuração <i>Load Sharing</i>	33
Figura 3.9 - Blocos em configuração <i>Stand By</i>	33
Figura 4.1 - Sistema K/N	37
Figura 4.2 - Disponibilidade instantânea sistema de pelotamento	38
Figura 4.3 - Hierarquia de ativos conforme ISO	39
Figura 4.4 - Divisão da unidade de pelotamento conforme ISO 14.224	40
Figura 4.5 - RBD da unidade de pelotamento	41
Figura 4.6 - RBD de uma linha de pelotamento	42
Figura 4.7 - RBD de um disco de pelotamento.....	42
Figura 4.8 - RBD de um transportador classificador de rolos	43
Figura 4.9 - RBD de um classificador de rolos	43
Figura 4.10 - RBD de um transportador de pelotas classificadas.....	44
Figura 4.11 - Exemplo de apontamento de dados no sistema MES.....	45
Figura 4.12 - Programação de manutenções preventivas anuais nas linhas de pelotamento.....	46
Figura 4.13 - Comportamento pós manutenção preventiva dos componentes	47
Figura 4.14 – RBD da linha de pelotamento 01.....	54
Figura 4.15 - URD do bloco Preventiva_1	55
Figura 4.16 - Disponibilidade estimada para linha de pelotamento 01	55
Figura 4.17 - Disponibilidade real da linha de pelotamento 01	56
Figura 4.18 – Diferenças de idades pré-simulação entre dois componentes diferentes	57

Figura 4.19 – Dados de produção do bloco	58
Figura 4.20 – Resultado de disponibilidade da análise RAM do sistema	59
Figura 4.21 – Mapa de paradas das linhas de pelotamento ao longo do período simulado.....	61
Figura 4.22 – Quantidade de eventos de falha esperados por linha de produção	61
Figura 4.23 – Indicador FCI para linha de pelotamento 01	62
Figura 4.24 – Indicador DTCl para linha de pelotamento 01	63
Figura 4.25 – Mapa de paradas da linha de pelotamento 01	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Função Confiabilidade do redutor do disco de pelotamento 01	48
Tabela 4.2 - Função Manutenibilidade do redutor do disco de pelotamento 01	48
Tabela 4.3 - Parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade dos componentes do disco de pelotamento 01	49
Tabela 4.4 - Função confiabilidade para componente centrífuga transportador do classificador de rolos	50
Tabela 4.5 - Função Manutenibilidade para o componente centrífuga do transportador do classificador de rolos	50
Tabela 4.6 - Parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade para o transportador do classificador de rolos	51
Tabela 4.7 – Função confiabilidade para a corrente do classificador de rolos 01	51
Tabela 4.8 – Função manutenibilidade para a corrente do classificador de rolos 01 ..	52
Tabela 4.9 – Parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade dos components do classificador de rolos 01	52
Tabela 4.10 – Função confiabilidade da centrífuga do coletor de pelotas classificadas 01	53
Tabela 4.11 - Função manutenibilidade da centrífuga do coletor de pelotas classificadas 01	53
Tabela 4.12 – Parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade do transportador coletor de pelotas classificadas	54
Tabela 4.13 – Idades pré-simulações de cada linha de pelotamento.....	57
Tabela 4.14 – Resultado da “disponibilidade ponderada” estimada pela simulação RAM	60
Tabela 4.15 – Resultado da disponibilidade ponderada real histórica para o sistema de pelotamento.....	60
Tabela 4.16 – Dados da simulação RAM da linha de pelotamento 01	65
Tabela 5.1 – Comparação entre valores de disponibilidade.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CDF	Cumulative Density Function
CMMS	Computerized Maintenance Management System
ISSO	International Standards Organization
LDA	Life Data Analysis
LRU	Lowest Replaceable Unit
MES	Manufacturing Executino System
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time to Repair
NBR	Norma Brasileira
PDF	Probability Density Function
PIMS	Plant Information Management System
RAM	Reliability Availability Maintainability
RBD	Reliability Block Diagram
SIPOC	Supplier, Input, Process, Output, Customer
TTF	Time to Failure

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	ASPECTOS GERAIS.....	13
1.2	TEMA.....	14
1.3	PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA	16
1.4	JUSTIFICATIVA.....	17
1.5	OBJETIVO.....	17
1.6	METODOLOGIA.....	18
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	SISTEMA DE PELOTAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO.....	18
2.1	SILOS DE PELOTAMENTO	21
2.2	DISCOS PELOTIZADORES	21
2.3	CLASSIFICADOR DE ROLOS	23
2.4	TRANSPORTADORES	23
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	26
3.1	DISPONIBILIDADE.....	26
3.2	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)	28
3.3	SISTEMAS REPARÁVEIS E NÃO REPARÁVEIS.....	30
3.4	DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE (RBD).....	31
3.5	ANÁLISE RAM.....	34
4	DESENVOLVIMENTO.....	36
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	36
4.2	DEFINIÇÃO DO SISTEMA	39
4.3	COLETA DE DADOS.....	45
4.4	CONSTRUÇÃO DO MODELO	46
4.4.1	Modelo de Disco de Pelotamento	47
4.4.2	Modelo do Transportador do Classificador de Rolos	49
4.4.3	Modelo do Classificador de Rolos	51
4.4.4	Modelo do Transportador de Pelotas Classificadas.....	52
4.5	VERIFICAÇÃO DO MODELO	54
4.6	PARAMETRIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO	56
4.7	SIMULAÇÃO DO MODELO.....	58
4.8	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	66
5	CONCLUSÃO.....	67
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

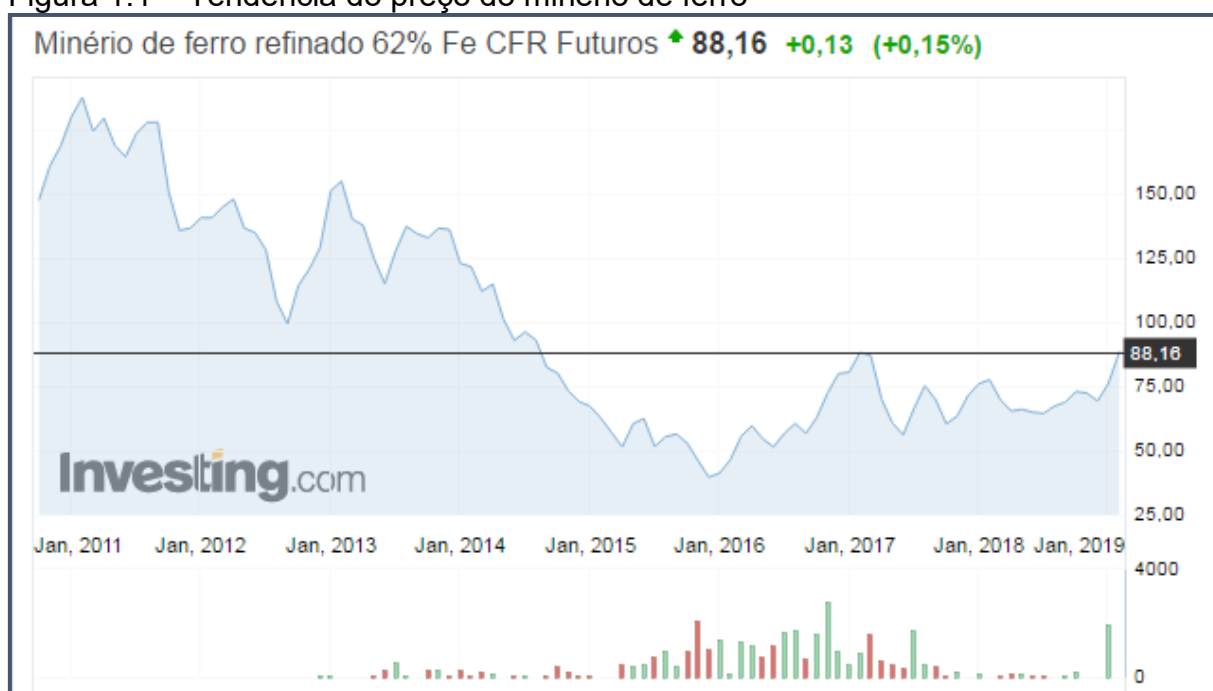
1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentadas as considerações iniciais sobre o trabalho, a definição do tema, seu escopo, o problema, a justificativa de escolha do tema, os objetivos, o método de pesquisa utilizado e a estrutura do documento.

1.1 ASPECTOS GERAIS

O preço de venda do minério de ferro no mercado internacional vem apresentando, nos últimos anos, uma queda acentuada, como pode ser observado na figura 1.1, e que segue o comportamento dos valores de outras *comodities* como o petróleo. Fatores ligados ao excesso de oferta do produto e à variação da demanda na China, principal consumidor mundial, ajudam a explicar esta queda.

Figura 1.1 – Tendência do preço do minério de ferro



Fonte: investing.com (2019)

Segundo Treacy e Wiersema (1998), toda empresa precisa se posicionar perante o mercado, o que estes autores chamam de Disciplina de Valor, cujas organizações só podem optar entre três, as quais são:

- **Liderança de produto:** empresas que buscam sempre inovar em seus produtos e serviços por vezes até melhores do que a expectativa do cliente (melhor tecnologia, design, marca, funcionalidades, etc.). O preço do produto geralmente é acima da média pois o cliente percebe um valor diferenciado no mesmo. Exemplos: Apple, Ferrari.
- **Intimidade com clientes:** Empresas que optaram por desenvolver uma relação customizada com os clientes, vindo daí a geração de valor de seu produto. Exemplos: Nubank, Itaú Personnalité.
- **Excelência operacional:** Empresas que buscam a melhor combinação entre qualidade, preço e funcionalidade. Exemplos: Ryan Air, McDonalds, Americanas.

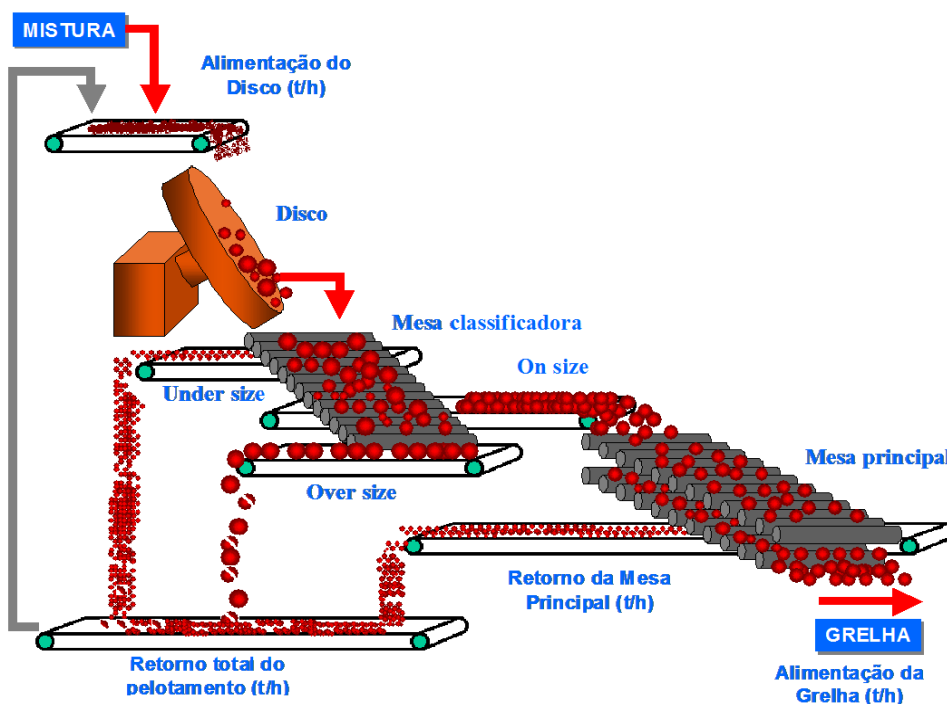
Empresas de mineração que operam com minério de ferro são organizações de uso intensivo de capital as quais, devido à natureza do seu produto, têm sua sobrevivência econômica ligada à estratégia da excelência operacional. Isto significa dizer que, como o preço de venda do seu produto é tabelado e a qualidade do mesmo influencia pouco no preço final, a operação eficiente, e principalmente estratégias que mantenham sob controle seus custos de produção, são fortes fatores influenciadores na saúde econômica do negócio.

Neste sentido, é possível concluir que a contribuição da manutenção industrial para o resultado das mineradoras é crucial, uma vez que é um dos departamentos da organização que mais consome recursos (custos) e cujo trabalho garante a disponibilidade operacional dos ativos (receitas).

1.2 TEMA

A companhia possui uma unidade de pelotização de minério de ferro. Um dos principais sistemas desta unidade são os chamados discos de pelotamento. São equipamentos que recebem o minério de ferro em estado granular e os transforma em pelotas de minério de ferro, algo mais próximo do produto final da empresa, conforme demonstrado na figura 1.2.1.

Figura 1.2.1 - Esquemático de um disco de pelotamento de minério de ferro



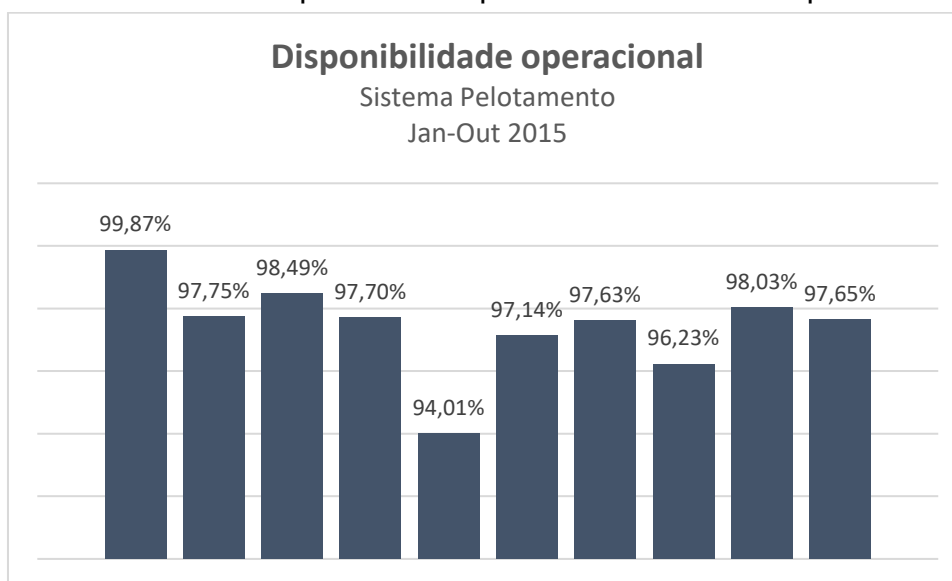
Fonte: O autor (2019)

O sistema de pelotamento é composto por 11 linhas de pelotamento. Cada linha possui ativos como silos, correias transportadoras e peneiras de rolos. Cada ativo possui componentes mecânicos clássicos como mancais, redutores, rolamentos, peças de desgaste e outros, além de componentes elétricos e de controle.

Devido ser um sistema exposto a elevado nível de contaminação e abrasividade, as estratégias de manutenção destes equipamentos contemplam manutenções preventivas, manutenções preditivas e manutenções corretivas, programadas ou emergenciais, sendo que todas elas geralmente demandam grande quantidade de mão de obra de manutenção e gastos com materiais mecânicos e elétricos.

Estas intervenções de manutenção influenciam um dos principais indicadores de desempenho da manutenção da linha, que é a disponibilidade ponderada. O histórico mensal deste indicador no ano de 2015 é demonstrado na figura 1.2.2.

Figura 1.2.2– Histórico de disponibilidade ponderada da linha de pelotamento



Fonte: O autor (2019)

Embora hajam 11 linhas de pelotamento, este sistema foi dimensionado para que no máximo um disco esteja parado para manutenção preventiva por vez, sem prejudicar a produção da unidade.

1.3 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

Periodicamente o setor de planejamento estratégico da empresa projeta a produção do próximo ciclo do negócio. Esta projeção é feita através da estimativa de vários parâmetros de desempenho operacional, entre eles, a disponibilidade ponderada das linhas de produção, os custos de manutenção e a produção esperada da linha.

A disponibilidade ponderada é um fator relevante na estimativa da produção da unidade e tradicionalmente é estimada através de média histórica. Entretanto, a estimativa empírica desta métrica pode provar-se imprecisa caso situações imprevistas durante a operação das linhas de produção ocorram. Exemplos destas situações são a falta de um sobressalente crítico, seja ela uma falta planejada ou não, modificações nas estratégias de manutenção dos ativos ou alterações nas periodicidades de intervenções.

Uma das premissas do trabalho é a existência de uma fonte de dados oficial da empresa que contemple as seguintes informações da linha de pelotamento:

- Registro de paradas por manutenção corretiva com seus respectivos tempos e motivos;
- Registros de paradas por modo de falha;
- Catálogo de modos de falha padronizados para a linha em questão;
- Registros históricos de disponibilidade e produção.

1.4 JUSTIFICATIVA

A justificativa para este projeto é a necessidade do desenvolvimento de um modelo que permita uma estimativa mais precisa dos parâmetros de produção (disponibilidade ponderada e produtividade) de maneira que as projeções da organização se encontrem dentro de uma margem de erro aceitável.

1.5 OBJETIVO GERAL

Criar um modelo computacional de um sistema de pelotização de minério de ferro através de um RBD (*Reliability Block Diagram*) e comparar o resultado de sua simulação com dados históricos reais para aferir a verossimilhança deste modelo.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICO

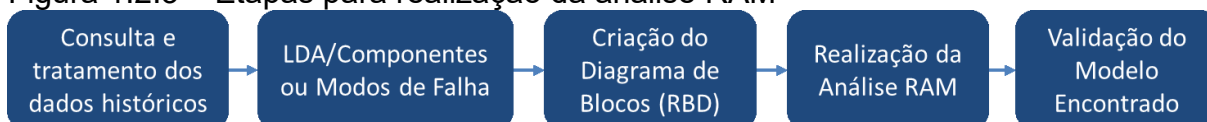
Realizar uma análise RAM (*Reliability Availability Maintainability*) a qual terá como saída informações como:

- Produção estimada para o período
- Disponibilidade estimada
- Disponibilidade “ponderada”
- Ativos que mais impactam na disponibilidade
- Curva de confiabilidade do sistema

1.7 METODOLOGIA

A análise RAM do sistema de pelotamento de minério de ferro será realizada seguindo as etapas mostradas na figura 1.2.3.

Figura 1.2.3 – Etapas para realização da análise RAM



Fonte: O autor (2019)

As curvas de confiabilidade dos componentes do sistema serão levantadas através de *Life Data Analysis* com base nos dados históricos dos ativos. Após esta etapa, será criado o diagrama de blocos do sistema no Blocksim e realizada a análise RAM do sistema.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento divide-se em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, é apresentada a introdução do tema, onde uma contextualização do trabalho é realizada.

No segundo capítulo é detalhado de maneira mais profunda o sistema industrial em questão (sistema de pelotamento) onde são demonstrados os ativos tema do projeto, seus componentes, modos de falha e modo de funcionamento.

No terceiro capítulo, é apresentado o referencial teórico que suporta o desenvolvimento do trabalho. Basicamente apresenta-se uma revisão de vários conceitos de confiabilidade quantitativa, como LDA (*Life Data Analysis*), análise RAM (*Reliability Availability Maintainability*) e RBD (*Reliability Block Diagram*).

O quarto capítulo demonstra o desenvolvimento dos trabalhos realizados tomando como base uma planta real. Também realiza a comparação dos resultados do modelo obtido e dos dados históricos.

Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões de todo o exposto acima e propostas para novos trabalhos.

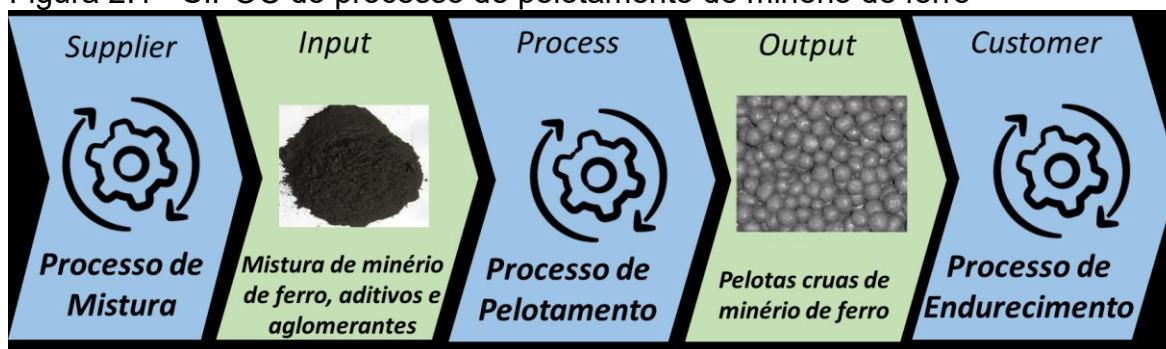
2 SISTEMA DE PELOTAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

O sistema de pelotamento, ou formação das pelotas cruas, ou ainda processo de aglomeração do minério de ferro, é responsável por uma das etapas mais importantes do processo de pelotização. O objetivo é a produção de pelotas numa faixa de tamanhos apropriada e com resistência mecânica suficiente para suportar as etapas de transferência e transporte entre os equipamentos de pelotamento e o endurecimento das pelotas.

O processo realizado pelo sistema de pelotamento de minério de ferro possui como entrada o *processo de mistura* do minério de ferro, onde uma mistura de finos de minério, aditivos e aglomerantes é fornecida ao sistema. Já o produto que sai deste processo são pelotas de minério de ferro cruas, que nada mais são do que aglomerados em formato esférico da mistura de minério de ferro fornecida para o sistema de pelotamento. O processo para o qual estas pelotas cruas são encaminhadas chama-se *processo de endurecimento*.

A título de ilustração, é possível demonstrar o sistema descrito acima através de um diagrama SIPOC (*Supplier, Input, Process, Output, Customer*) ilustrado na figura 2.1.

Figura 2.1 - SIPOC do processo de pelotamento de minério de ferro



Fonte: O autor (2019)

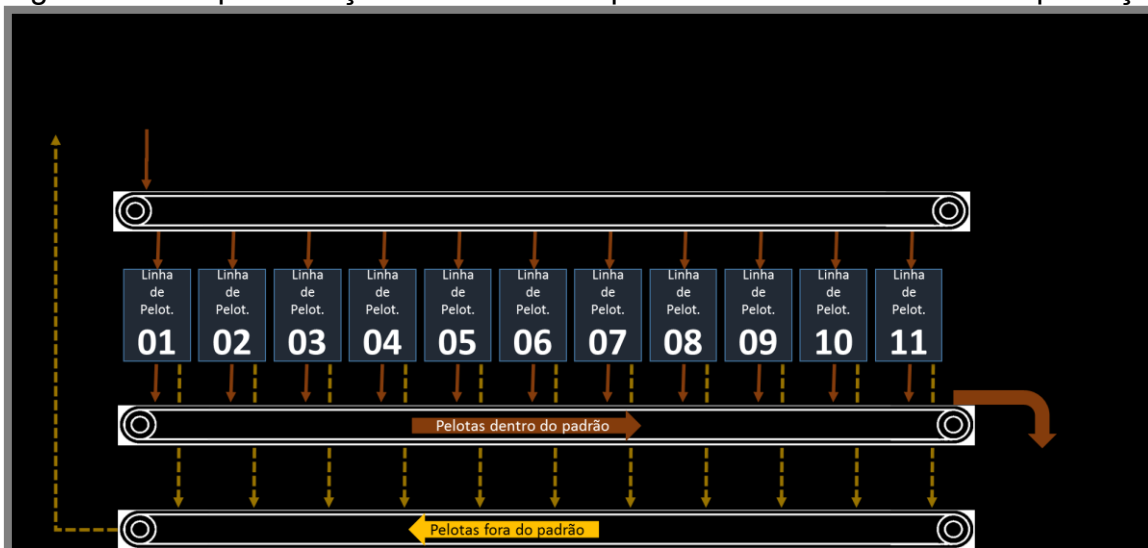
O sistema de pelotamento, responsável pelo processo de pelotamento, é composto por 11 linhas individuais. Estas linhas são independentes entre si e operam em paralelo. A capacidade nominal de cada linha de pelotamento é de 122 t/h, enquanto a capacidade nominal do sistema de pelotamento é de 1.220 t/h.

Importante observar que a soma das capacidades nominais individuais das linhas de pelotamento é maior do que a capacidade nominal do sistema. Isto ocorre devido a uma das premissas de projeto ser a necessidade de pelo menos 10 linhas

operando para que a produção normal seja mantida, enquanto sempre poderá haver 1 linha parada, seja para manutenção ou ajustes operacionais.

Desta maneira, o sistema de pelotamento com suas 11 linhas de produção paralelas, é demonstrado na figura 2.2.

Figura 2.2 - Representação do sistema de pelotamento e suas linhas de produção

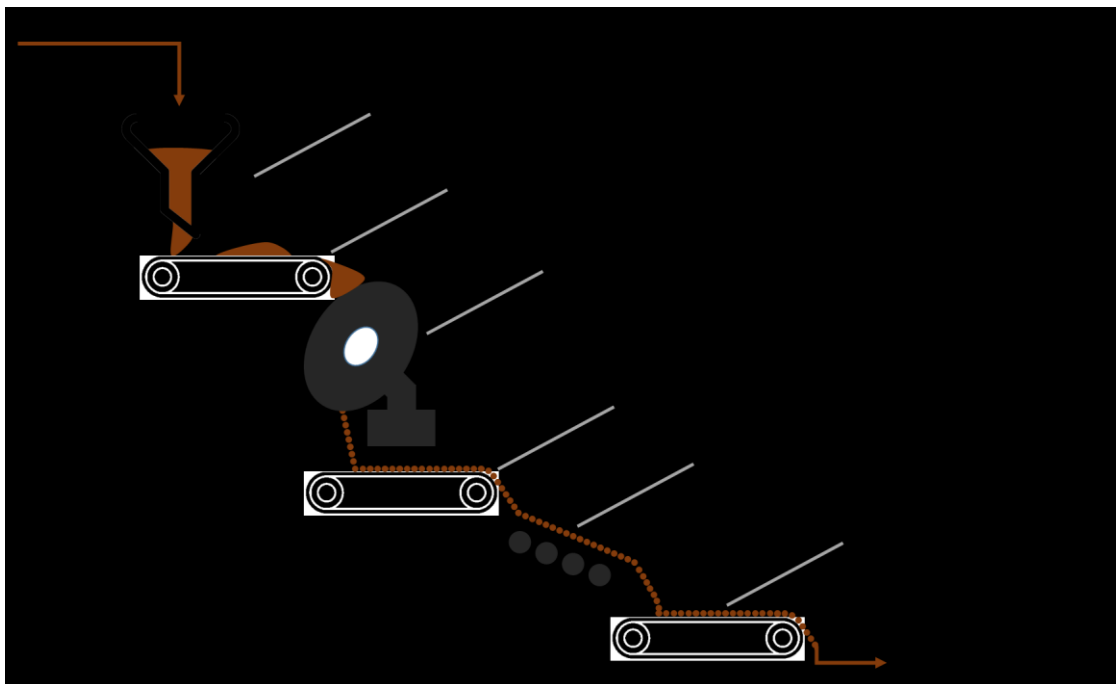


Fonte: O autor (2019)

Cada linha de pelotamento é composta pelos seguintes ativos, os quais se relacionam da maneira mostrada na figura 2.3.

- Silo de pelotamento
- Alimentador
- Disco de pelotamento
- Transportador do Classificador de Rolos
- Classificador de Rolos
- Transportador Coletor de Pelotas Classificadas

Figura 2.3 - Representação de uma linha de pelotamento



Fonte: O autor (2019)

2.1 SILOS DE PELOTAMENTO

No sistema em estudo existem 11 unidades instaladas, sendo um para cada disco de pelotamento. Cada silo possui capacidade de armazenamento de cerca de 150 toneladas de material. São silos metálicos, com proteção interna contra desgaste e dotado de instrumentação para controle de nível.

Estes silos também possuem motovibradores conectados às suas paredes para permitir a desagregação de materiais que por ventura venham a ficar retidos internamente.

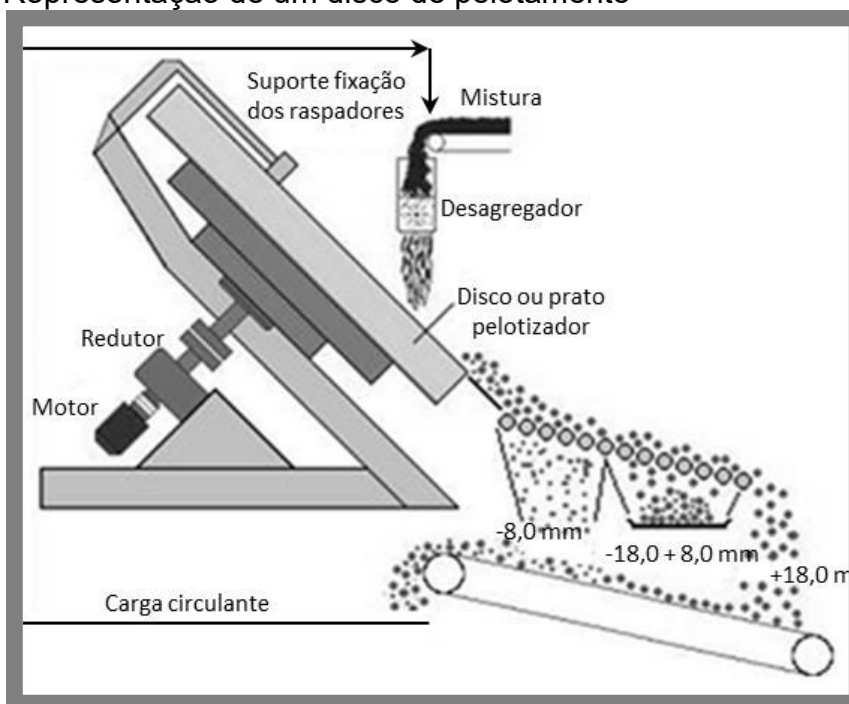
Os silos têm a função de uniformizar a alimentação de material para o disco de pelotamento além de servir como um reservatório intermediário de minério que permite curtíssimas paradas sem que a produção seja interrompida.

2.2 DISCOS PELOTIZADORES

Os discos de pelotização são os ativos responsáveis por gerar as pelotas de minério de ferro cruas. O produto a ser pelotizado é umedecido e através do contínuo movimento de rotação do disco e através do contato com o seu fundo, o produto toma

a forma esférica. Um esquemático de um disco é demonstrado na figura 2.4 e um exemplo real é apresentado na figura 2.5.

Figura 2.4 - Representação de um disco de pelotamento



Fonte: Fonseca (2003)

Figura 2.5 - Exemplos de discos de pelotamento reais



Fonte: Vale.com (2019)

Estes discos possuem controle de inclinação e velocidade, sendo estes parâmetros de produção que influenciam nas dimensões do produto final.

2.3 CLASSIFICADOR DE ROLOS

É um sistema de classificação por dimensões das pelotas cruas. É composto por uma série de rolos motorizados adjacientemente posicionados, de maneira que o espaçamento entre os mesmos determina se uma pelota passa ou não passa por este espaço. Através do correto ajuste destes espaços, é possível selecionar que passem adiante ao processo apenas as pelotas com as dimensões corretas de produção, sendo que as que não atendem às dimensões requeridas retorna ao início do processo de pelletização. Um exemplo real de um classificador de rolos pode é demonstrado na figura 2.6.

Figura 2.6 - Exemplo de classificador de rolos



Fonte: Koch do Brasil (2019)

2.4 TRANSPORTADORES

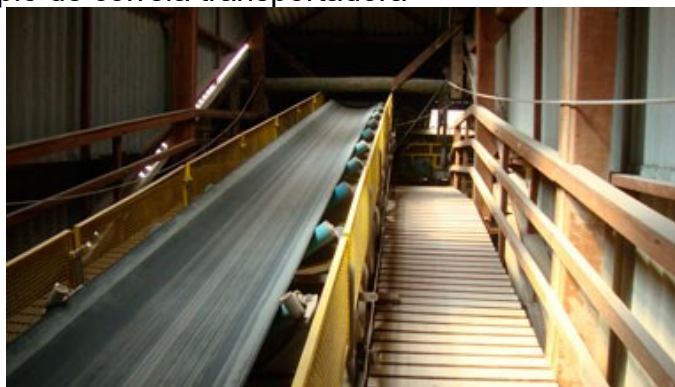
Os transportadores que compõem a linha de pelletamento são:

- **Alimentador:** Leva material do silo de pelletamento para o disco;
- **Transportador do Classificador de Rolos:** Leva material da saída do disco para a peneira de rolos

- **Transportador Coletor de Pelotas Classificadas:** Recebe as pelotas dentro das dimensões especificadas pelo processo.

Um exemplo real de um transportador de correia pode ser observado na figura 2.7.

Figura 2.7 - Exemplo de correia transportadora



Fonte: Haco (2019)

Todos transportadores são de pequeno comprimento, acionados por motorreductores e com esticamento por tirante.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentada a base teórica relacionada à engenharia de confiabilidade e que sustentará o desenvolvimento do trabalho.

A confiabilidade é definida como a “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Frequentemente, na teoria da engenharia da confiabilidade, a confiabilidade também é dada como “a duração ou probabilidade de uma performance livre de falha sob condições específicas” (DEPARTMENT OF DEFENSE - DEFINITIONS OF TERMS FOR RELIABILITY AND MAINTENABILITY, 1981).

3.1 DISPONIBILIDADE

Disponibilidade é a “capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

As principais classificações de disponibilidade encontradas na literatura são:

- a) Disponibilidade instantânea ou pontual:** “É a probabilidade que um sistema ou componente estará operacional em um instante de tempo t ” (RELIAWIKI, 2019). É um conceito parecido com a confiabilidade, porém leva em consideração a função de densidade da *Manutenibilidade* ($m(t)$). É dada pela equação:

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u) \cdot m(u) \cdot du$$

Onde:

$R(t)$ é a função confiabilidade do equipamento ou sistema

u é o instante de tempo da última falha do equipamento ou sistema

$m(t)$ é a função manutenibilidade do equipamento ou sistema

- b) **Disponibilidade média:** “É a porção do tempo, durante um intervalo específico, no qual o equipamento ou sistema estava disponível para operar” (RELIAWIKI, 2019). É a medida mais comumente utilizada em aplicações industriais.

É dada pela equação:

$$\overline{A(t)} = \frac{1}{t} \int_0^t A(u) du$$

Onde:

$A(u)$ é a função de disponibilidade instantânea

- c) **Disponibilidade em regime contínuo:** é a “disponibilidade pontual do sistema com o tempo de operação tendendo a infinito” (RELIAWIKI, 2019) e é dada pela equação.

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$$

Onde:

$A(t)$ é a função disponibilidade instantânea do equipamento ou sistema.

- d) **Disponibilidade intrínseca:** é a “disponibilidade em regime contínuo quando considerados apenas os tempos de parada do sistema devido às manutenções corretivas” (RELIAWIKI, 2019), ou seja, não são contabilizadas as manutenções preventivas. É dada pela equação

$$A_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Onde:

$MTBF$ é o tempo médio entre falhas do sistema

$MTTR$ é o tempo médio de reparo das falhas do sistema

- e) **Disponibilidade operacional:** é a “disponibilidade média medida dentro de um período quando são computados todos os tipos de intervenção de manutenção” (RELIAWIKI, 2019), sejam elas corretivas ou preventivas, e é dada pela equação:

$$A_o = \frac{\text{Tempo Operacional}}{\text{Ciclo Operacional}}$$

Onde:

Tempo Operacional é todo o tempo que o ativo esteve disponível para operar.

Ciclo Operacional é o período de análise escolhido.

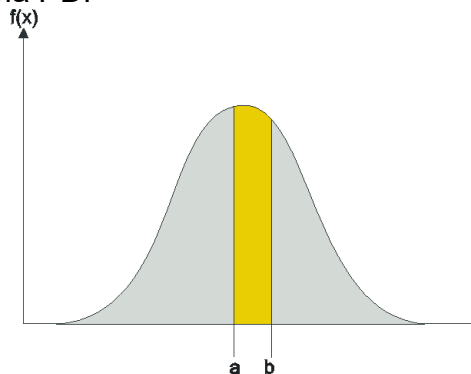
3.2 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)

O principal objetivo da análise de dados de vida é a obtenção de uma curva de distribuição estatística que descreva o tempo até a falha de um componente ou sistema. Esta distribuição é obtida através da coleta de várias amostras de tempo de vida de um componente ou sistema, ou seja, do tempo decorrido entre o início do funcionamento do item até sua falha, considerando que todos os itens são submetidos às mesmas condições operacionais (RELIAWIKI, 2019).

Uma vez coletadas estas amostras, é escolhido um modelo de distribuição que melhor representa a probabilidade de falha levantada no estudo. Obviamente, quanto maior a quantidade de amostras coletadas, mais preciso é o modelo que estima a distribuição estatística das falhas.

Destas amostras, duas funções podem ser obtidas. A *PDF*, ou, *Probability Distribution Function*, traduzida como Função de Distribuição de Probabilidade e a *CDF*, ou, *Cumulative Distribution Function*, conhecida como Função de Distribuição Acumulada (WEIBULL.COM, 2019). Ambas são matematicamente representadas por $f(x)$ e $F(x)$ respectivamente, onde x é a variável aleatória em questão. A figura 3.1 demonstra um exemplo de uma *PDF*.

Figura 3.1 - Exemplo de uma PDF



Fonte: weibull.com (2019)

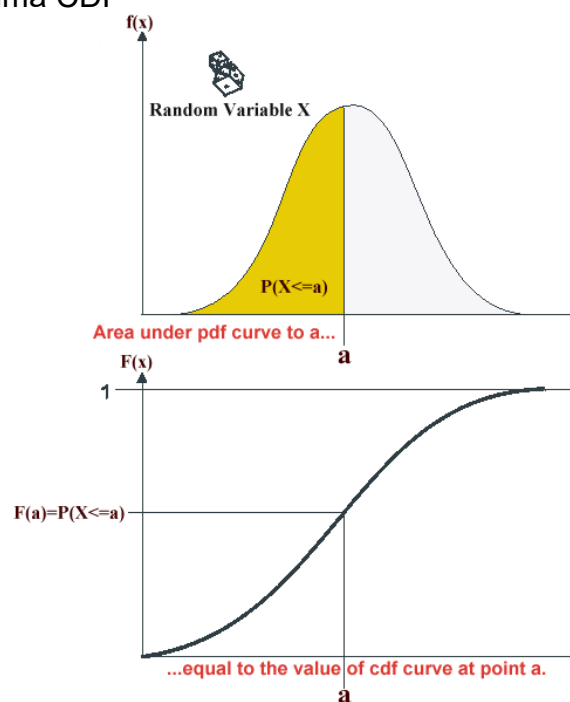
Considerando uma *pdf* $f(x)$ qualquer, temos que a probabilidade da variável aleatória x estar entre os valores a e b é dada por (WEIBULL.COM, 2019):

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x)dx$$

Entretanto, para aplicações de confiabilidade, uma métrica de maior utilização prática é a *cdf*. Ela mede a probabilidade de a variável aleatória assumir um valor x e sua equação é dada por:

$$P(x \leq a) = \int_0^a f(x)dx$$

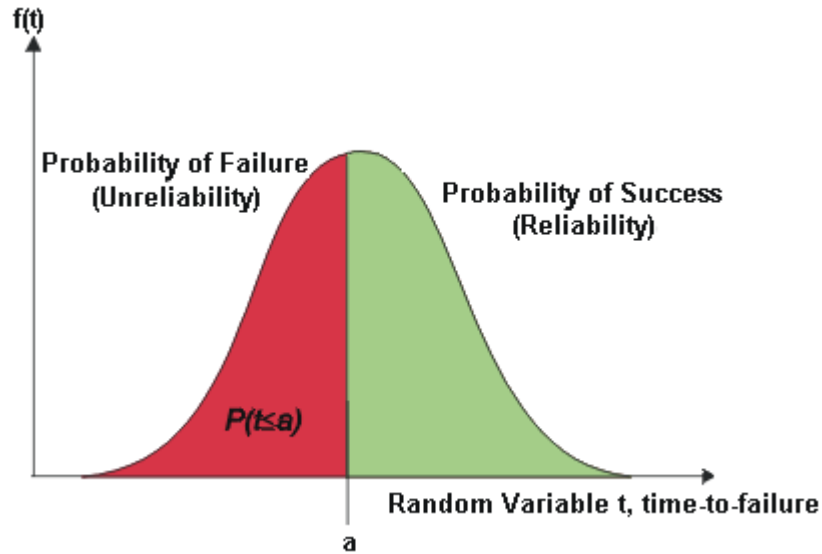
Figura 3.2 - Exemplo de uma CDF



Fonte: weibull.com (2019)

Uma vez introduzidos os conceitos de *PDF* e *CDF* é possível aplicar-lhes à confiabilidade. Neste âmbito, a variável aleatória considerada passa a ser o *tempo de vida* de um componente, ou, o *tempo até a falha*, também conhecido pela sigla *TTF* (WEIBULL.COM, 2019). Desta maneira, considere a *PDF* mostrada na figura 3.3.

Figura 3.3 - PDF para sucesso/insucesso de funcionamento



Fonte: weibull.com (2019)

Integrando-se a parte vermelha da curva, obtém-se a probabilidade de um item falhar até o instante t . A esta função convencionou-se chamar de *Função de Não Confiabilidade*, a qual é representada pela equação de $Q(t)$.

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt$$

Já se integrando a parte verde da curva, obtém-se a probabilidade de um item funcionar pelo menos até o instante t . A *CDF* desta região convencionou-se chamar de *Função Confiabilidade*, ou, $R(t)$.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

3.3 SISTEMAS REPARÁVEIS E NÃO REPARÁVEIS

Sistemas não-reparáveis são aqueles cujo retorno ao funcionamento, após uma falha, só é dado através da substituição completa de todo sistema.

Sistemas reparáveis são aqueles cuja operação satisfatória pode ser restaurada através de qualquer ação, incluindo substituição de partes ou ajuste de parâmetros (RELIAWIKI, 2019).

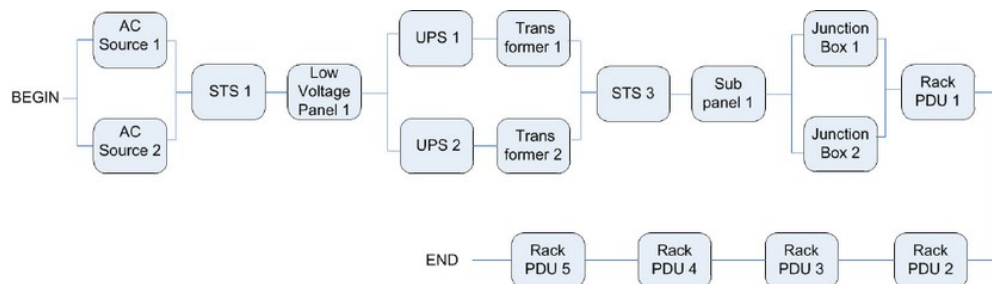
Exemplos de sistemas não-reparáveis são lâmpadas, baterias, roletes de correias transportadoras e outros itens ou sistemas completamente substituíveis.

Exemplos de sistemas reparáveis são automóveis, correias transportadoras, computadores e outros compostos por vários subsistemas reparáveis ou não-reparáveis.

3.4 DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE (RBD)

Um diagrama de blocos de confiabilidade, ou *RBD (Reliability Block Diagram)* é a representação gráfica dos componentes e subsistemas que compõem um sistema e como suas propriedades de confiabilidade se relacionam. O diagrama representa o funcionamento do sistema através da correlação entre o funcionamento de seus blocos, como pode ser demonstrado na figura 3.4.

Figura 3.4 - Exemplo de um RBD



Fonte: Ferreira (2013)

Cada bloco de um *RBD* pode representar um componente ou um modo de falha específico (RELIAWIKI, 2019). Vários tipos de interações entre estes blocos podem existir, sendo que as mais encontradas são:

- **Configuração série:** É a configuração onde a falha de apenas um bloco é o suficiente para causar a falha do sistema, como exemplificado na figura 3.5.

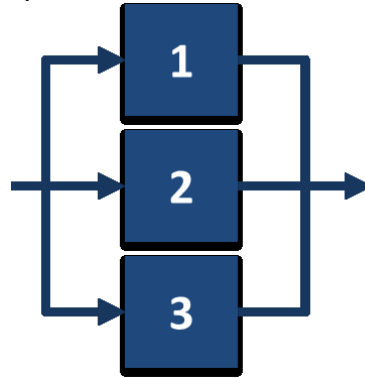
Figura 3.5 - Blocos em Configuração Série



Fonte: O autor (2019)

- **Configuração paralelo:** É a configuração onde todos os blocos precisam falhar para que o conjunto falhe, como exemplificado na figura 3.6.

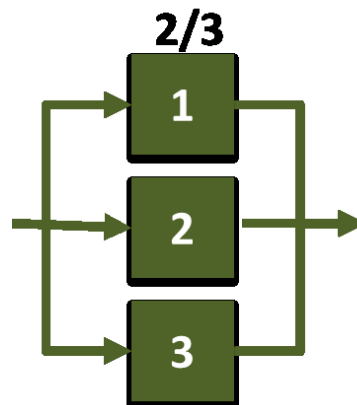
Figura 3.6 - Blocos em configuração paralela



Fonte: O autor (2019)

- **Configuração K de N :** É uma configuração de N blocos em paralelo, cujo funcionamento do sistema depende apenas do funcionamento de K destes blocos, como exemplificado na figura 3.7.

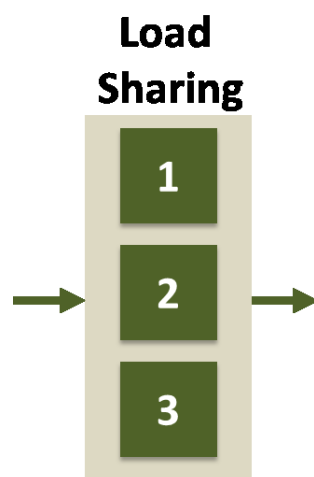
Figura 3.7 - Blocos em configuração K/N



Fonte: O autor (2019)

- **Configuração em *load sharing*:** É um tipo de configuração paralela onde todos os componentes têm que falhar para que o sistema em load sharing falhe. Entretanto, cada componente que falha, impõe que os outros sejam submetidos a condições de funcionamento diferentes, como exemplificado na figura 3.8.

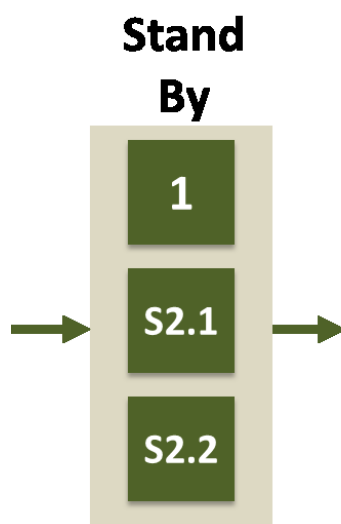
Figura 3.8 - Blocos em configuração *Load Sharing*



Fonte: O autor (2019)

- **Configuração em *stand by*:** É uma configuração redundante de componentes ou blocos em paralelo que permanecem inativos e disponíveis para funcionamento quando necessário, como exemplificado na figura 3.9.

Figura 3.9 - Blocos em configuração *Stand By*



Fonte: O autor (2019)

3.5 ANÁLISE RAM

A análise RAM (*Reliability Availability and Maintainability*) é um método conhecido de se estimar a disponibilidade de um sistema através do estudo de seus modos de falha, frequências de falha e consequências de falha. Geralmente, é utilizado para se verificar se a meta de produção estabelecida para uma planta ou sistema é capaz de ser atingida. Também é utilizado para encontrar as melhores maneiras, em termos de custo benefício, para otimizar soluções de operação para uma planta (WEIBULL.COM, 2019).

A condução de uma análise RAM pode ser dividida em oito etapas: (i) Definição do problema, (ii) definição do sistema, (iii) coleta de dados, (iv) construção do modelo, (v) verificação do modelo, (vi) parametrizar a simulação, (vii) rodar o modelo e analisar o resultado e (viii) documentar, apresentar e utilizar os resultados.

A **definição do problema** consiste na declaração do problema e no objetivo do estudo, além das questões específicas a serem respondidas. Deve-se identificar as métricas de performance que serão avaliadas para mensurar a eficiência do sistema. Geralmente estas métricas envolvem a confiabilidade, a disponibilidade, a produção e os custos. Outra definição importante é a janela de tempo da análise e os recursos necessários para a mesma.

Na **definição do sistema** são relacionados os diferentes elementos da análise e como eles interagem entre si. Geralmente o sistema é modelado através de um diagrama de blocos ou um diagrama de blocos de confiabilidade (*RBD*). O nível de detalhamento do modelo é um fator que pode determinar o sucesso ou o fracasso da análise. O principal objetivo desta etapa é definir um modelo conceitual do sistema que seja adequado para a solução do problema e das perguntas levantadas na etapa anterior.

A **coleta de dados** é a etapa que geralmente requer maior esforço, dependendo de quão bem estruturada é a base de dados disponível. Informações quantitativas devem ser reunidas, como as PDFs de falha e de tempo de reparo por componente, equipamento ou modo de falha.

A **construção do modelo** geralmente é feita em softwares específicos, os quais reduzem o tempo de modelamento quando comparado a métodos não especializados, como planilhas eletrônicas ou códigos de programação.

A **verificação do modelo** serve para se aferir que o modelo construído está funcionando conforme o esperado. Se a performance da saída do modelo é baseada em um sistema existente atual, existe a oportunidade de se verificar se o modelo reproduziu o comportamento do sistema real.

Na **parametrização da simulação** define-se condições como o tempo da análise, a quantidade de interações da simulação numérica utilizada, qual o tempo inicial de funcionamento do sistema e outros.

Ao se **rodar o modelo**, o software executa o algoritmo estocástico e apresenta os **dados de saída**. Após esta etapa, o software apresenta diversos indicadores importantes para a simulação os quais devem ser interpretados de acordo com a realidade da análise.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será desenvolvida a sequência de passos para realização da análise RAM pretendida. Também ficarão aqui registrados todos os parâmetros encontrados para o sistema em questão.

4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

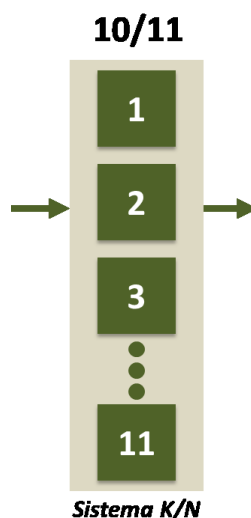
Antes de serem explanados os problemas, desafios e objetivos da análise RAM proposta para o processo de pelotamento desta organização, é crucial apresentar uma peculiaridade do método de medição de disponibilidade física deste ativo na empresa estudada.

Como apresentado no item 3.1 deste trabalho, existem várias classificações de disponibilidade que podem ser utilizadas por uma organização, mas todas elas compartilham de um conceito chave: A condição de ativo disponível.

Portanto, quando se trata de disponibilidade, o ativo só pode adotar dois estados mutuamente excludentes: Disponível para operação ou indisponível para operação. Isto significa dizer que, segundo a teoria, um ativo nunca poderia estar 30% disponível ou 70% disponível em um determinado instante de tempo t , ou seja, ou ele está disponível ou está indisponível.

Para exemplificar o conceito acima é possível usar um sistema que possua 11 ativos na configuração paralelo, mas que precise apenas de 10 funcionando para cumprir a função requerida do sistema. Portanto, segundo a teoria apresentada no capítulo 3, este sistema é um K/N onde $K=10$ e $N=11$ e é representado pela figura 4.1.

Figura 4.1 - Sistema K/N



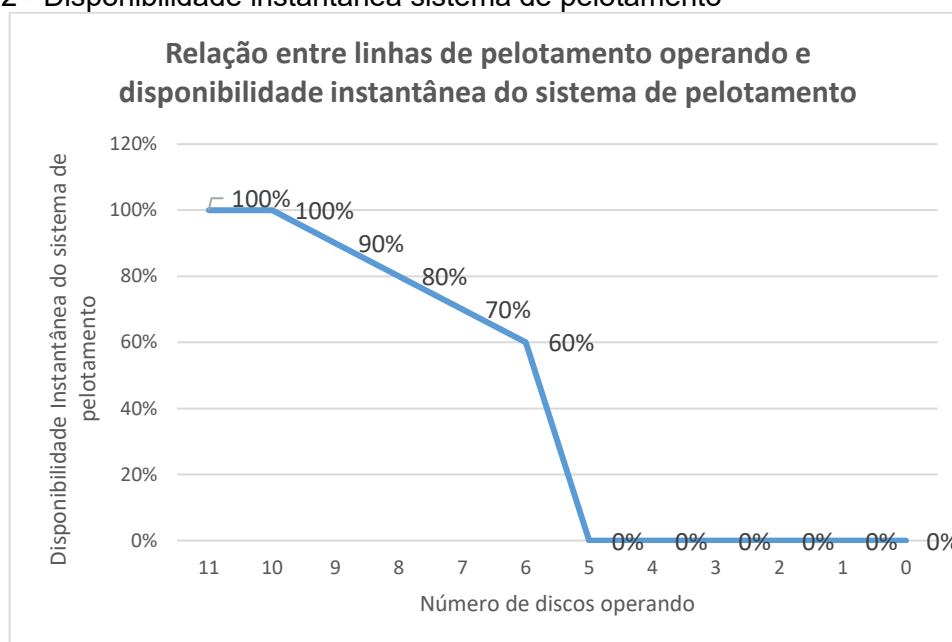
Fonte: O autor (2019)

Portanto, para este arranjo de equipamentos, o sistema será considerado disponível em qualquer instante t onde, pelo menos, 10 dos blocos estejam funcionando. Se dois ou mais blocos estiverem falhados, o sistema, como um todo, será considerado indisponível.

Entretanto, para o sistema de pelotamento estudado, a organização que o opera optou por um sistema de medição de disponibilidade com uma característica diferente. Nesta empresa, caso o sistema de pelotamento opere com, pelo menos, 10 das 11 linhas de pelotamento, ele será considerado disponível para efeitos de disponibilidade.

A partir do momento que mais uma linha de pelotamento entre em falha e o sistema passe a operar com 9 linhas, o sistema de pelotamento não fica indisponível, como seria de se esperar em um sistema K/N, mas torna-se “90% disponível”. Caso mais uma linha falhe e o sistema passe a operar com 8 linhas de pelotamento, ele se torna “80% disponível” e assim por diante até chegar a um limite de 5 linhas operando. Nesta situação, o sistema é considerado indisponível. Este comportamento de disponibilidade é demonstrado pela curva da figura 4.2.

Figura 4.2 - Disponibilidade instantânea sistema de pelotamento



Fonte: O autor (2019)

Desta maneira, a determinação da disponibilidade do sistema de pelotamento não poderá ser realizada da maneira convencional numa análise RAM pois o que esta organização em particular considera como “disponibilidade” do seu sistema não é a disponibilidade clássica contida na análise RAM, mas sim o que se convencionou chamar de “disponibilidade ponderada”. A solução para este problema de ordem prática é apresentada nos próximos tópicos.

Conforme visto no item 3.5, a presente etapa da análise RAM deve conter a definição dos problemas aos quais se busca solução através da análise, os quais são listados a seguir:

- a) Falta de embasamento quantitativo para aquisição de sobressalentes e determinação de periodicidade de manutenções preventivas;
- b) Falta de uma base metodológica para estimar os efeitos de lucro cessante e aumento de custos nos casos de postergações de manutenções devido falta de mão de obra ou oportunidade operacional;
- c) Falta de um modelo para priorização dos diversos serviços no pelotamento mensurando os riscos individuais da postergação de cada atividade;
- d) Desconhecimento do comportamento, em termo de confiabilidade, de cada componente ou modo de falha, prejudicando a decisão de qual fragilidade solucionar para aumentar o desempenho global do sistema;

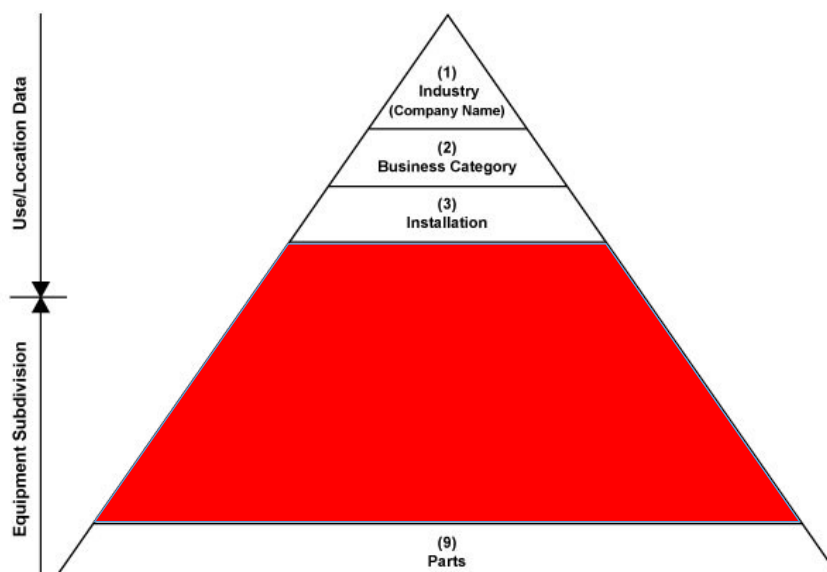
Para solucionar os problemas acima, este estudo tem por objetivo os seguintes:

- a) Levantar as curvas de confiabilidade e manutenibilidade dos componentes relevantes dos equipamentos que compõem o sistema de pelotamento;
- b) Usar as informações do item “a” para criar um diagrama de blocos de confiabilidade (*RBD*) representando todo o sistema de pelotamento;
- c) Fazer uma análise *RAM* (simulação) num intervalo de tempo específico para obter, dentre outras variáveis, a disponibilidade do sistema e dados que subsidiem o entendimento de quais ativos e componente mais contribuem na performance do sistema;
- d) Comparar os resultados obtidos com a análise *RAM* com o histórico do sistema de pelotamento para validar, ou não, o modelo encontrado.

4.2 DEFINIÇÃO DO SISTEMA

A definição do sistema e como seus mais variados componentes interagem entre si depende que seja adotada uma padronização de hierarquia de ativos. Com este fim, foi adotada a hierarquia conforme a norma ISO 14.224, demonstrado na figura 4.3.

Figura 4.3 - Hierarquia de ativos conforme ISO

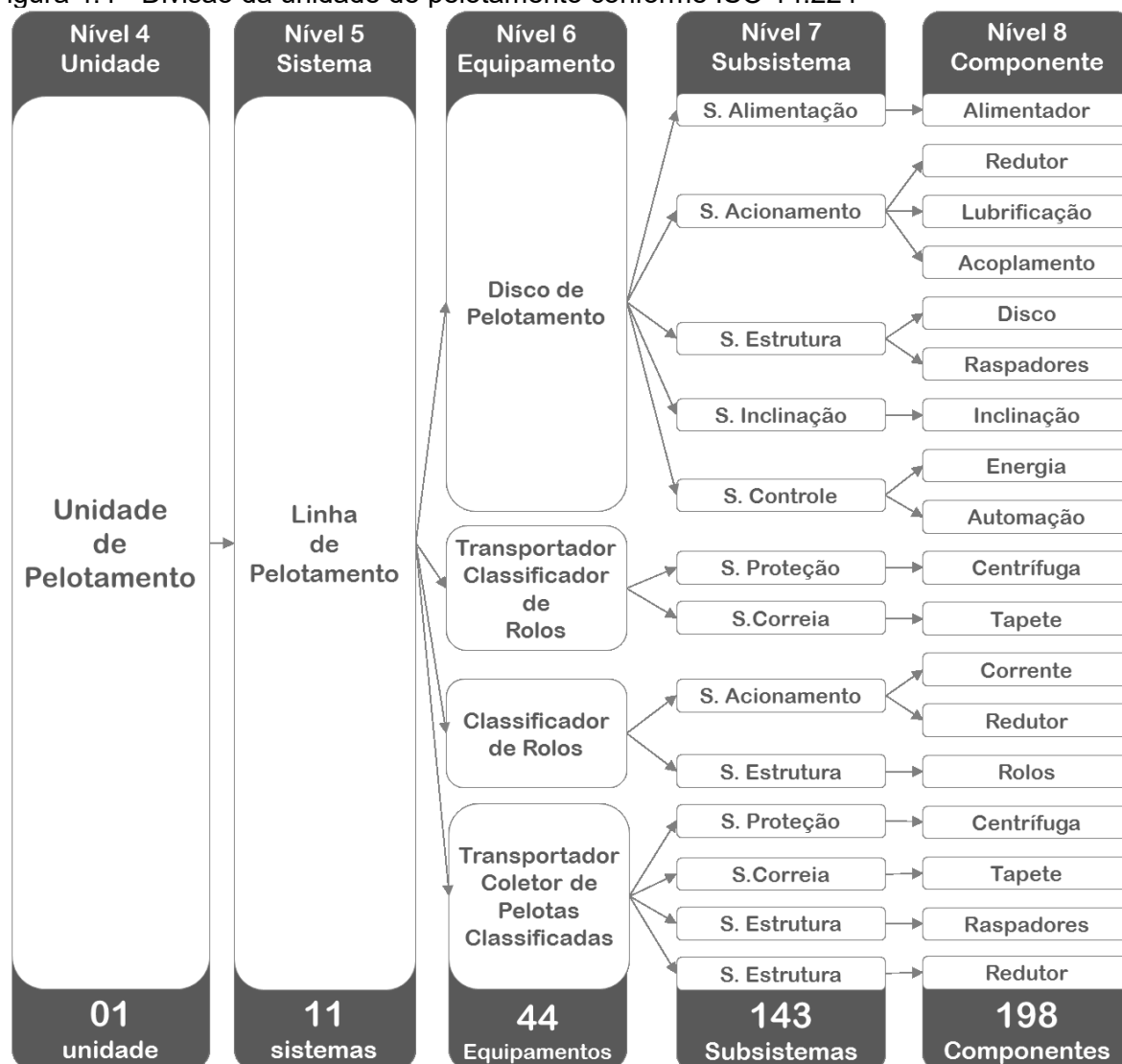


Fonte: ISO 14.224 (2013)

Dos nove níveis disponíveis pela norma, foram utilizados os cinco grifados em vermelho. Existe uma unidade de pelotamento (nível 4), contendo onze linhas de pelotamento (nível 5) distintas e dispostas em paralelo.

Cada uma das 11 linhas possui quatro equipamentos (nível 6), totalizando 44 ativos que, por sua vez, totalizam 198 componentes (nível 8), todos reparáveis.

Figura 4.4 - Divisão da unidade de pelotamento conforme ISO 14.224

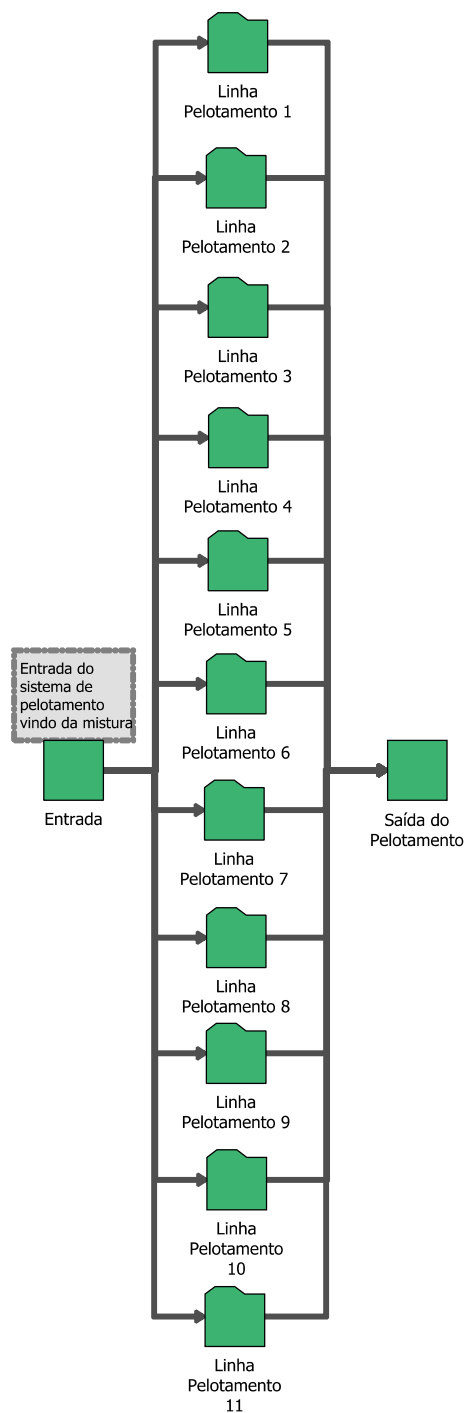


Fonte: O autor (2019)

Importante destacar que estes ativos possuem outros subsistemas e componentes além dos listados, entretanto, os outros componentes não apresentaram falhas no período estudado, razão pela qual foram omitidos da representação hierárquica.

Uma vez introduzido os conceitos de hierarquia de ativos considerados para esta análise, é possível criar o diagrama *RBD* da unidade de pelotamento, demonstrado na figura 4.5.

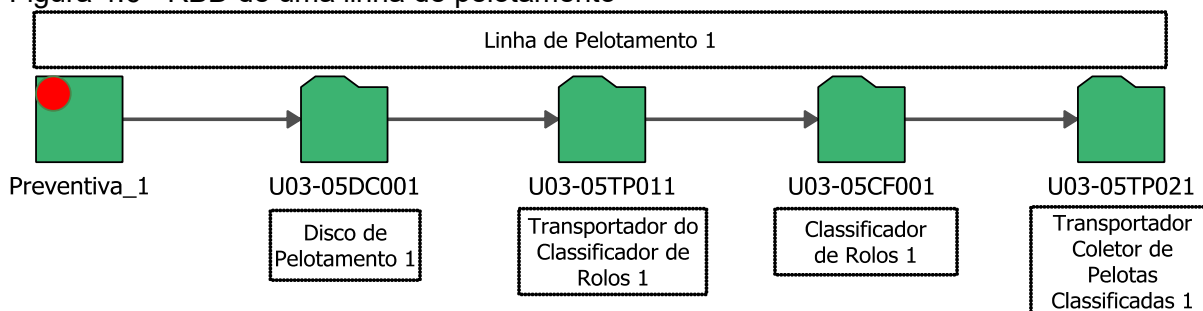
Figura 4.5 - RBD da unidade de pelotamento



Fonte: O autor (2019)

Cada linha de pelotamento é representada por um subdiagrama. Este subdiagrama contém o *RBD* que representa os equipamentos de uma linha, como mostrado na figura 4.6.

Figura 4.6 - RBD de uma linha de pelotamento



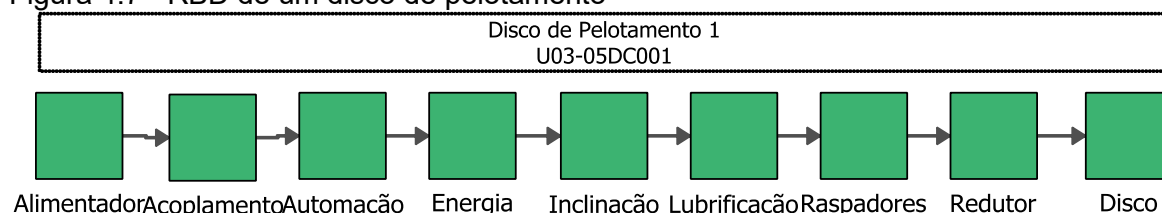
Fonte: O autor (2019)

Os códigos do subdiagrama da figura 4.6 (U03-05DC001, U03-05TP011, U03-05CF001, U03-05TP021) são *tags* que identificam os equipamentos no processo produtivo da organização estudada.

O primeiro bloco (“Preventiva_1”) é o único que não representa um equipamento, mas sim, as paradas para manutenção preventiva ao longo da operação da linha. Este bloco é parametrizado para provocar paradas recorrentes ao sistema, na mesma frequência das manutenções preventivas, e, também, com durações iguais às destas manutenções.

Cada equipamento mostrado também é um subdiagrama e seus *RBD* são demonstrados na figura 4.7.

Figura 4.7 - RBD de um disco de pelotamento



Fonte: O autor (2019)

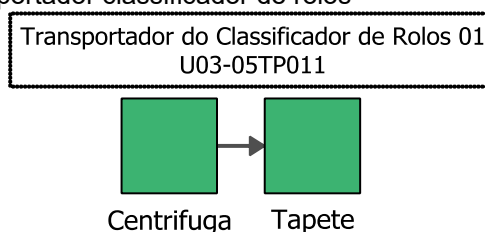
O bloco “Alimentador” reúne todo o subsistema de alimentação do disco, composto por um silo e uma pequena correia transportadora. Os blocos “Acoplamento”, “Redutor” e “Lubrificação” fazem parte do sistema de acionamento do disco.

Os blocos “Disco” e “Raspadores” estão relacionados a componentes estruturais do disco, enquanto o bloco “Inclinação” é todo o sistema de alteração do ângulo do equipamento.

O bloco “Automação” diz respeito ao controlador lógico programável que comanda todo o disco e o bloco “Energia” relaciona-se com toda a cadeia de alimentação elétrica do equipamento, inclusive a concessionária.

O transportador classificador de rolos é um equipamento de menor complexidade do que o disco e apenas dois blocos demonstram as falhas encontradas durante o período estudado, conforme demonstrado na figura 4.8.

Figura 4.8 - RBD de um transportador classificador de rolos

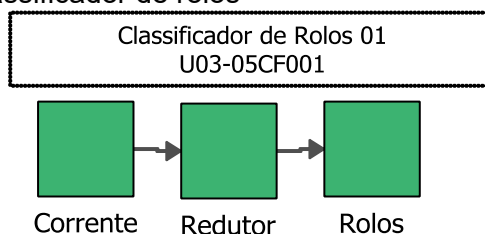


Fonte: O autor (2019)

O bloco “Centrifuga” representa as falhas relacionadas ao deslizamento do tapete da correia transportadora no tambor de acionamento, enquanto o bloco “Tapete” representa as falhas relacionadas à integridade do tapete da correia transportadora.

Outro equipamento de menor complexidade é o classificador de rolos, demonstrado na figura 4.9.

Figura 4.9 - RBD de um classificador de rolos

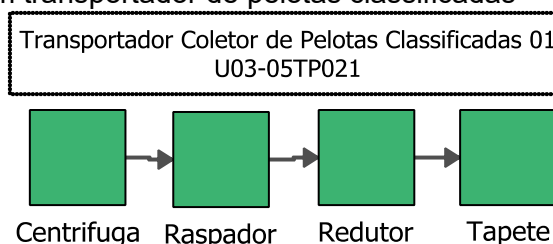


Fonte: O autor (2019)

Os blocos “Corrente” e “Redutor” representam o acionamento do equipamento, enquanto o bloco “Rolos” representa a parte estrutural dos rolos classificadores que realizam a seleção de pelotas de minério conforme e não conforme.

As pelotas conforme são transportadas pelo transportador de pelotas classificadas, cujo RBD é mostrado na figura 4.10.

Figura 4.10 - RBD de um transportador de pelotas classificadas



Fonte: O autor (2019)

O bloco “Centrífuga” representa as falhas relacionadas ao deslizamento do tapete da correia transportadora no tambor de acionamento, enquanto o bloco “Tapete” representa as falhas relacionadas à integridade do tapete da correia transportadora.

O bloco “Redutor” faz parte do sistema de acionamento do equipamento e o bloco “Raspador” é a parte estrutural do acessório responsável por remover resíduos do tapete da correia transportadora.

Para cada uma das 11 linhas de pelotamento a estrutura de *RBD* acima foi reproduzida, chegando até o nível dos 198 blocos elementares de componentes.

Importante destacar que no histórico de falhas levantado, embora cada bloco elementar tenha sido apresentado como um componente, estes blocos também representam modos de falha majoritariamente únicos. Isto quer dizer que o bloco de “tapete”, embora seja um componente, em seu levantamento histórico observa-se que o modo de falha majoritário é relacionado a problemas na emenda da correia. Assim como o bloco de raspador, que é um componente, estar ligado ao modo de falha majoritário de raspador gasto ou quebrado.

Esta simplicidade nos modos de falha deste sistema permitiu dividir o RBD em componentes, ao invés de modos de falha, mantendo adequado nível de precisão no modelo. Sendo assim, estes blocos foram considerados níveis LRU (*Lowest*

Replaceable Unit) ou, no caso de um sistema reparável, a menor unidade de intervenção de reparo.

4.3 COLETA DE DADOS

Esta etapa tem como objetivo levantar todos os dados históricos de tempo entre paradas e duração das paradas para que cada bloco tenha suas curvas de confiabilidade e manutenibilidade modeladas no próximo passo. Estes dados foram levantados individualmente para cada componente e a janela de tempo escolhida foi de **dois anos**.

Durante este período havia a garantia que os sistemas não sofreram grandes modificações de engenharia que alterassem as condições de funcionamento dos equipamentos e que as estratégias de manutenção se mantiveram constantes.

Para a realização deste levantamento são utilizadas três fontes de dados históricos providos por sistemas específicos da organização estudada:

- Sistema MES (*Manufacturing Execution System*), que é um sistema de apontamento de status operacionais dos equipamentos de produção;
- Sistema PIMS (*Plant Information Management System*), que é um sistema de monitoramento e registro de variáveis operacionais e;
- Sistema CMMS (*Computerized Maintenance Management System*), que é o sistema de gestão de manutenção da organização, onde dados com os motivos e informações complementares das falhas são armazenados.

Figura 4.11 - Exemplo de apontamento de dados no sistema MES

Equipamento	Início	Término	Horas		Motivo	Descrição
			Parada	Tipo		
305DC001	19/01/2012 10:30	19/01/2012 10:33	0,05	MNT	Interlock	Atuou chave de centrifuga na 05TP011.
305DC001	29/02/2012 07:30	29/02/2012 07:41	0,18	MNT	Parada não programada	Falha de lubrificação no mancal.
305DC001	29/02/2012 09:21	29/02/2012 09:34	0,22	MNT	Parada não programada	Falha de lubrificação de engrenagem.
305DC001	29/02/2012 20:50	29/02/2012 20:53	0,05	MNT	Parada não programada	Disco parado com indicação de parada local, porém na botoeira de desliga
305DC001	05/03/2012 10:49	05/03/2012 23:59	13,17	MNT	Parada programada	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2019)

O levantamento de dados por si só não garante uma precisão na modelagem dos dados de confiabilidade e manutenibilidade dos componentes. As fontes históricas de informação muitas vezes não são suficientes, e o conhecimento do funcionamento do sistema a ser estudado tem função importante na análise.

4.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Os dados das paradas de manutenção da linha de pelotamento 01 foram compilados e analisados individualmente, gerando suas respectivas curvas de confiabilidade e manutenibilidade.

A correta interpretação dos dados depende do conhecimento prévio das rotinas de manutenção preventiva dos equipamentos e de como **cada modo de falha se comporta após a realização da mesma**.

A equipe de manutenção, durante o período analisado, possuía a política de manutenção preventiva de parada por tempo. Através desta política, cada linha de pelotamento era parada **1 vez por ano durante 5 dias**. Dentro destas paradas programadas, atividades de manutenção (trocas, reparos, revisões, limpeza, reapertos e outros) eram realizadas em alguns componentes, enquanto atividades de inspeção eram realizadas em outros componentes.

Figura 4.12 - Programação de manutenções preventivas anuais nas linhas de pelotamento

LINHA	Parada para Manutenção Preventiva											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Pelotamento 1	■											
Pelotamento 2		■										
Pelotamento 3			■									
Pelotamento 4				■								
Pelotamento 5					■							
Pelotamento 6						■						
Pelotamento 7							■					
Pelotamento 8								■				
Pelotamento 9									■			
Pelotamento 10										■		
Pelotamento 11											■	

*Duração de cada parada: 5 dias

Fonte: O autor (2019)

Dependendo da política de atuação de cada componente durante a manutenção preventiva, alguns saem da mesma com o status “as good as new” (tão bom quanto novos), ou seja, passam por intervenções preventivas que restabelecem

a condição do mesmo para uma situação equiparável a um componente novo (idade 0).

Outros componentes, após a mesma manutenção preventiva, saem com o status “*as bad as old*” (tão ruim quanto velhos), ou seja, este tipo de manutenção não produz efeito significativo no componente e, ao fim da manutenção, o mesmo prossegue funcionando com a idade de quando parou.

O conhecimento de como cada componente se comporta após a manutenção preventiva é crucial para que, ao se analisar os dados de falha, a correta distribuição probabilística possa ser alcançada.

Figura 4.13 - Comportamento pós manutenção preventiva dos componentes

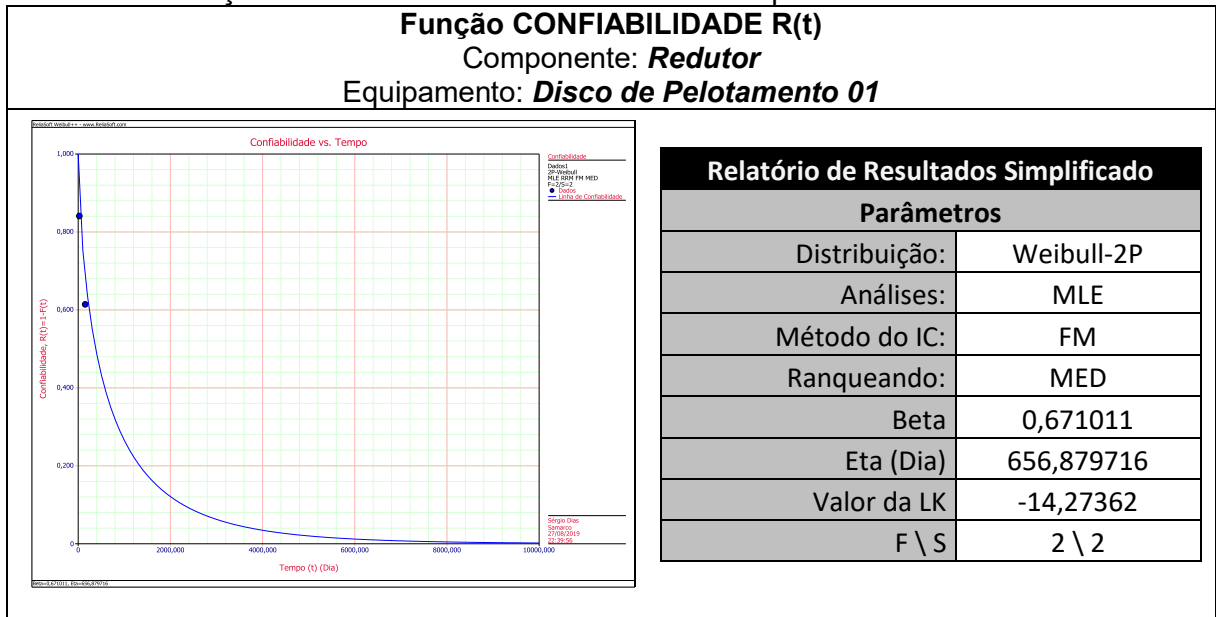
Condição dos Componentes após Preventiva			
Equipamento	Componente	As good as new	As bad as old
Disco de Pelotamento	Acoplamento		✓
	Alimentador	✓	
	Automação		✓
	Disco	✓	
	Energia		✓
	Inclinação		✓
	Lubrificação	✓	
	Redutor		✓
Transportador do Classificador de	Centrífuga		✓
	Tapete		✓
Classificador de Rolos	Corrente	✓	
	Redutor		✓
	Rolos	✓	
Transportador Coletor de Pelotas Classificadas	Centrífuga		✓
	Raspador	✓	
	Redutor		✓
	Tapete		✓

Fonte: O autor (2019)

4.4.1 Modelo de Disco de Pelotamento

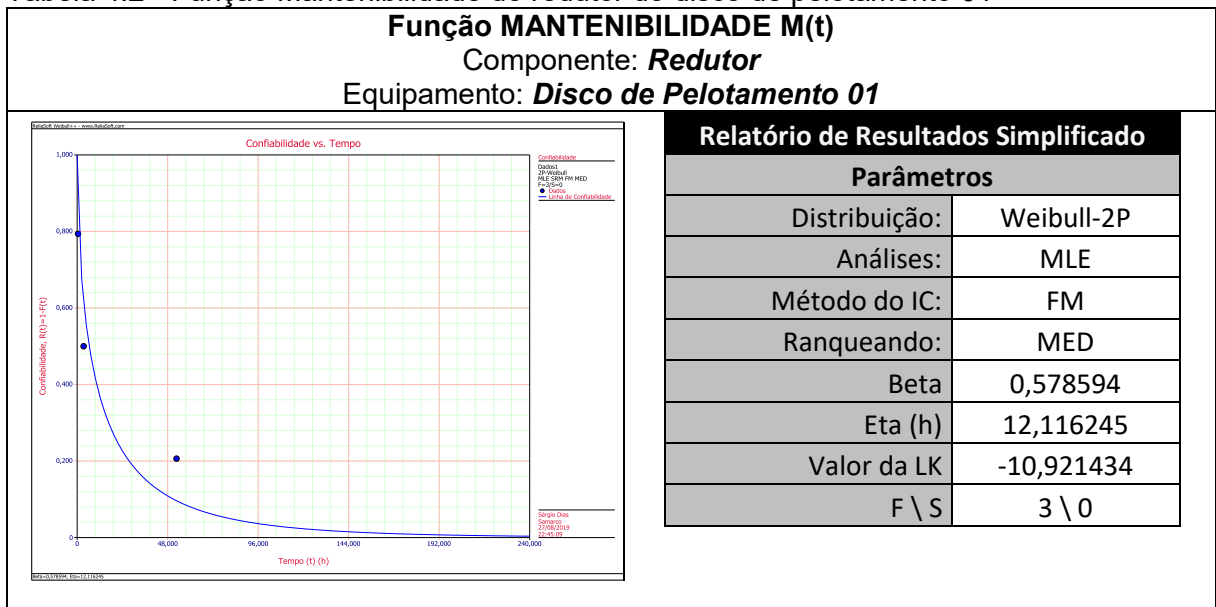
Cada componente do disco de pelotamento 01 (U03-05DC001) foi modelado através do software Weibull++. Exemplos das curvas encontradas para o componente *Redutor* podem ser observados nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Função Confiabilidade do redutor do disco de pelotamento 01



Fonte: O autor (2019)

Tabela 4.2 - Função Mantenibilidade do redutor do disco de pelotamento 01



Fonte: O autor (2019)

Após o cálculo de todos os componentes, obtiveram-se as distribuições probabilísticas mostradas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade dos componentes do disco de pelotamento 01

Equipamento	Componente	Confiabilidade			Manutenibilidade		
		Weibull 2P (dias)			Weibull 2P (horas)		
		b	h	LK	b	h	LK
Disco de Pelotamento 01 <i>U03-05DC001</i>	Acoplamento	1,621	239,26	-25,73	0,933	17,81	-19,54
	Alimentador	2,333	90,27	-30,76	0,882	0,934	-6,92
	Automação	0,857	559,96	-14,47	0,528	0,401	-0,76
	Disco	0,602	372,49	-12,84	0,993	2,13	-3,51
	Energia	1,082	174,21	-36,89	1,379	1,462	-8,52
	Inclinação	0,624	692,67	-14,19	0,489	12,36	-11
	Lubrificação	0,537	60,06	-75,4	0,476	0,356	-3,63
	Raspador	0,848	558,51	-14,46	1,609	12,74	-9,96
	Redutor	0,671	656,88	-14,27	0,578	12,11	-10,92

Fonte: O autor (2019)

É possível observar que alguns componentes possuem característica de falha por desgaste ($b > 1$), como o Acoplamento e o Alimentador. As falhas no alimentador possuem esta característica pois um dos principais modos de falha é o desprendimento de placas de desgaste de polietileno, o que está fortemente atrelado a idade de operação deste componente.

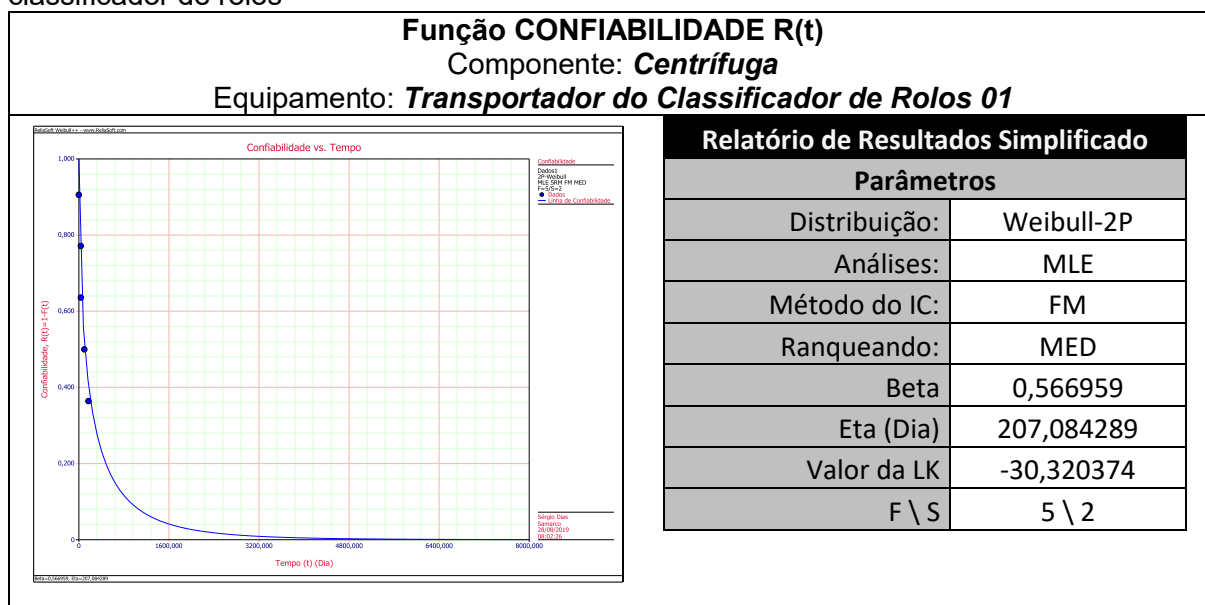
Outros componentes possuem características de falha precoces ($b < 1$) como o Disco, Inclinação, Lubrificação e Redutor. São modos de falha que mostram prováveis erros de montagem ou de intervenção.

Por fim, alguns componentes possuem características de falhas aleatórias (b próximo a 1) como Automação, Energia e Raspador. Isto se deve ao fato da Automação possuir majoritariamente componentes eletrônicos, a Energia depender de fatores externos como alimentação da concessionária e o Raspador quebrar de acordo com contaminações aleatórias que surgem no produto.

4.4.2 Modelo do Transportador do Classificador de Rolos

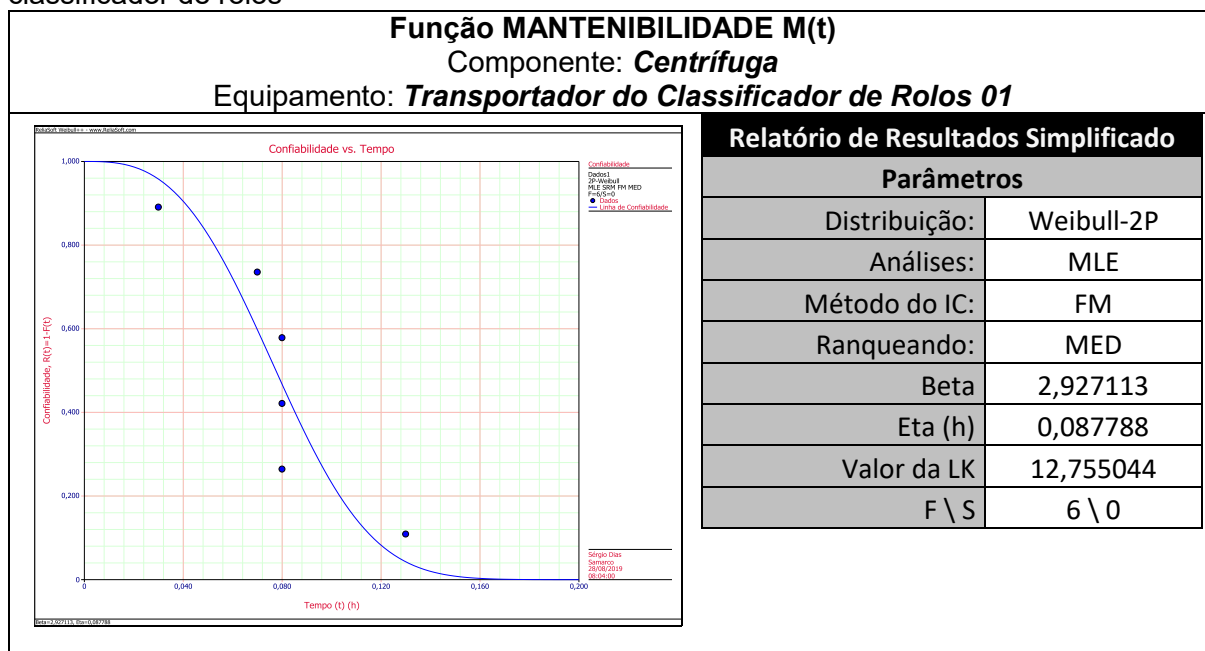
Da mesma maneira, cada componente do transportador do classificador de rolos 01 (U03-05TP011) foi modelado através do software Weibull++. Exemplos das curvas encontradas para o componente *Centrifuga* podem ser observados nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Função confiabilidade para componente centrífuga transportador do classificador de rolos



Fonte: O autor (2019)

Tabela 4.5 - Função Mantenibilidade para o componente centrífuga do transportador do classificador de rolos



Fonte: O autor (2019)

Após o cálculo de todos os componentes, obtiveram-se as distribuições probabilísticas mostradas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade para o transportador do classificador de rolos

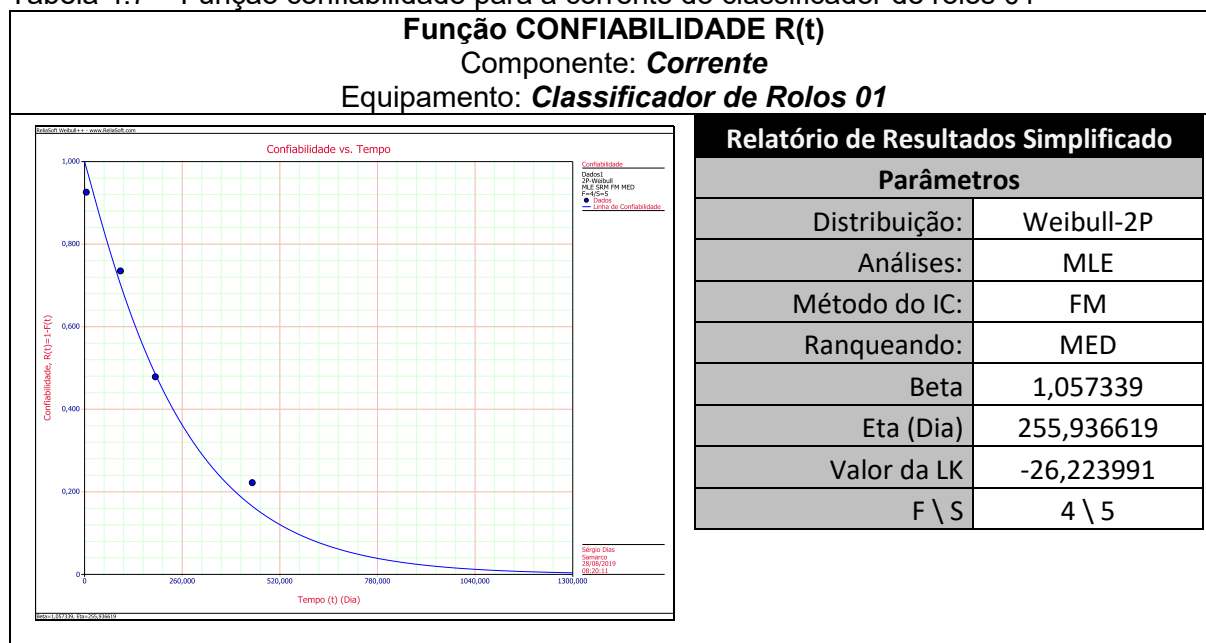
Equipamento	Componente	Confiabilidade			Manutenibilidade		
		b	h	LK	b	h	LK
Transportador do Classificador de Rolos U03-05TP011	Centrífuga	0,566	207,08	-30,32	2,927	0,08	12,75
	Tapete	0,573	273,67	-25,2	0,541	5,97	-14,69

Fonte: O autor (2019)

4.4.3 Modelo do Classificador de Rolos

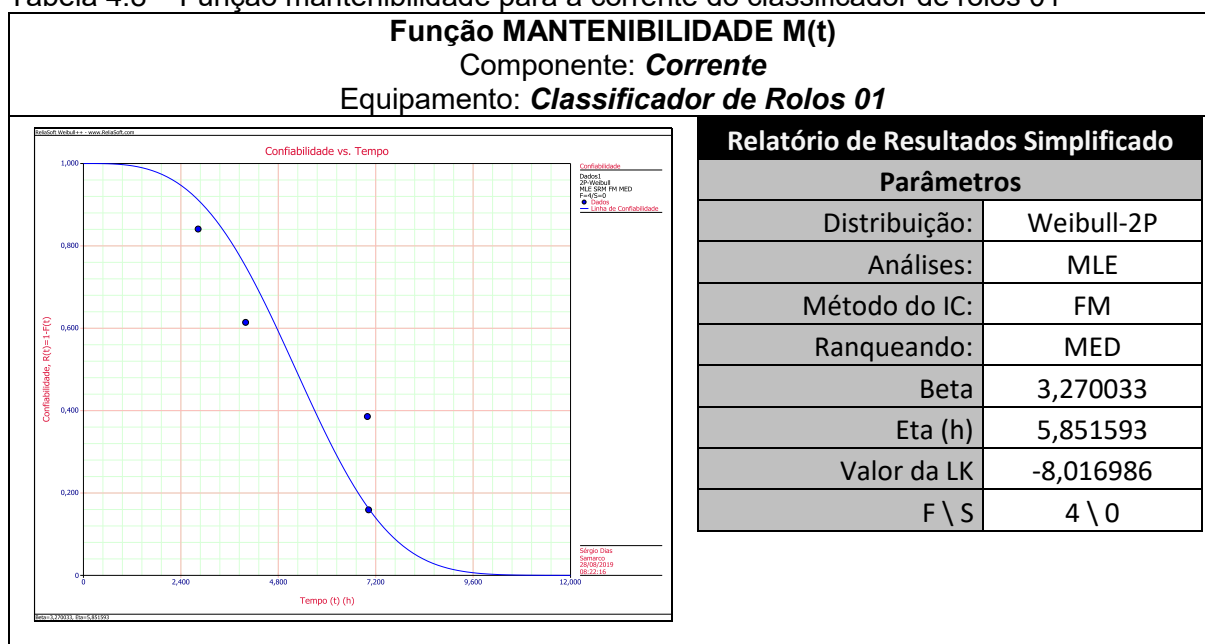
Da mesma maneira, cada componente do classificador de rolos 01 (U03-05CF001) foi modelado através do software Weibull++. Exemplos das curvas encontradas para o componente *Corrente* podem ser observados nas tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 – Função confiabilidade para a corrente do classificador de rolos 01



Fonte: O autor (2019)

Tabela 4.8 – Função mantenedibilidade para a corrente do classificador de rolos 01



Fonte: O autor (2019)

Após o cálculo de todos os componentes, obtiveram-se as distribuições probabilísticas mostradas na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros de confiabilidade e mantenedibilidade dos componentes do classificador de rolos 01

Equipamento	Componente	Confiabilidade			Mantenedibilidade		
		b	h	LK	b	h	LK
Classificador de Rolos U03-05CF001	Corrente	1,057	255,9	-26,22	3,27	5,851	-8,01
	Redutor	1,369	891,32	-7,88	2,509	6	-
	Rolos	1,955	284,78	-26,21	3,07	1,862	-2,78

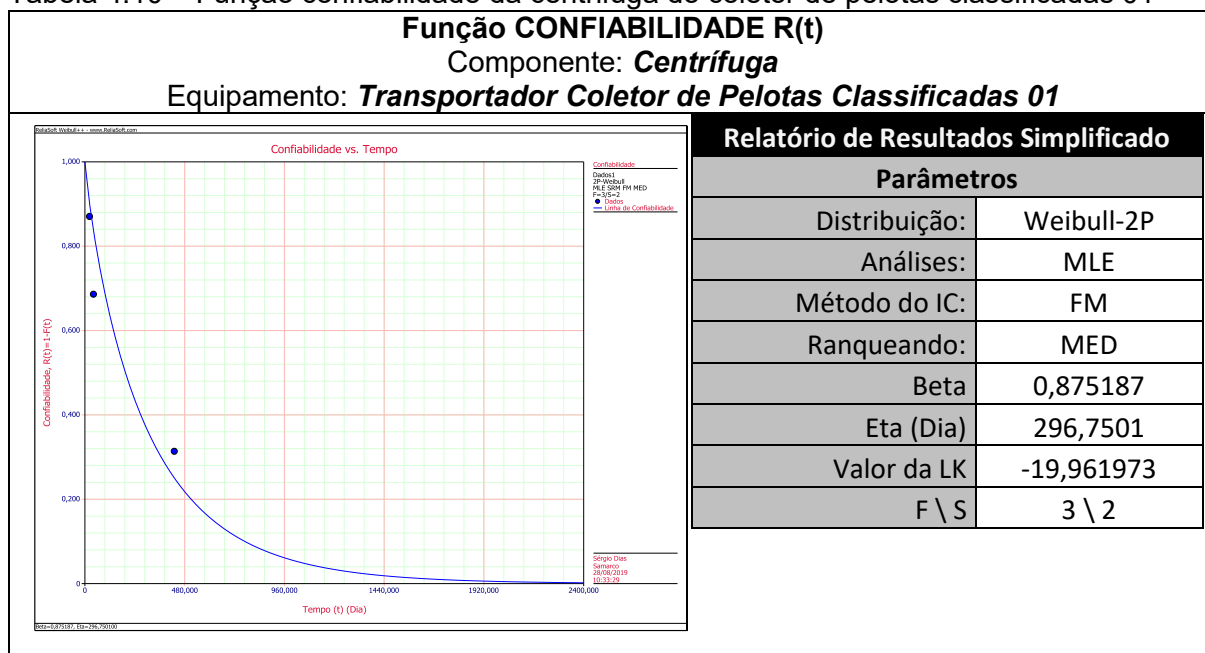
Fonte: O autor (2019)

Todos os componentes deste ativo possuem características de falha por desgaste ($b > 1$). Isto se explica pelo fato dos rolos terem falhas baseadas em desgaste superficial e a corrente ter modos de falha relacionados a ruptura por ciclo e folgas.

4.4.4 Modelo do Transportador de Pelotas Classificadas

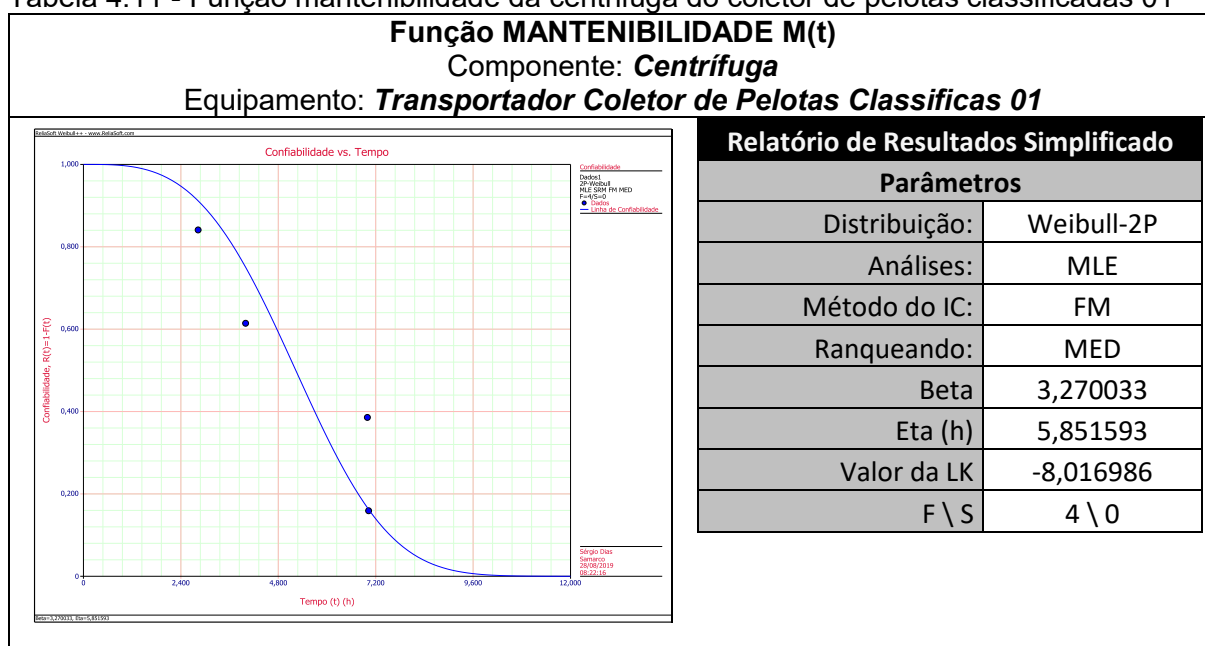
Da mesma maneira, cada componente do transportador coletor de pelotas classificadas 01 (U03-05TP021) foi modelado através do software Weibull++. Exemplos das curvas encontradas para o componente *Centrífuga* podem ser observados nas tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10 – Função confiabilidade da centrífuga do coletor de pelotas classificadas 01



Fonte: O autor (2019)

Tabela 4.11 - Função mantenedibilidade da centrífuga do coletor de pelotas classificadas 01



Fonte: O autor (2019)

Após o cálculo de todos os componentes, obtiveram-se as distribuições probabilísticas mostradas na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade do transportador coletor de pelotas classificadas

Equipamento	Componente	Confiabilidade			Manutenibilidade		
		b	h	LK	b	h	LK
Transportador Coletor de Pelotas Classificadas U03-05TP021	Centrífuga	0,971	346,91	-20,53	30,63	0,079	16,96
	Raspador	0,875	296,75	-19,96	2,51	1	-
	Redutor	0,49	822,36	-13,66	1,05	2,19	-5,29
	Tapete	1,452	401,03	-14,02	1,702	0,728	-1,69

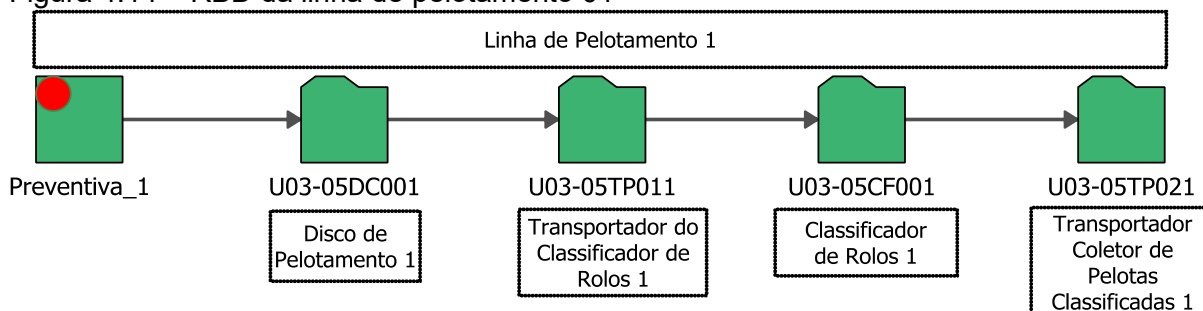
Fonte: O autor (2019)

4.5 VERIFICAÇÃO DO MODELO

Nos tópicos anteriores foi realizado todo o modelamento do comportamento de falha e de manutenibilidade dos componentes da linha de pelotamento 01, o qual lançou mão de dados históricos reais. Sendo assim, com o intuito de verificar a acurácia do modelo levantado para esta linha, deve ser feita uma comparação dos resultados obtidos através das simulações com os dados de performance real desta linha de produção.

A variável de comparação será a disponibilidade desta linha de produção durante um período específico. A disponibilidade do modelo será obtida através de uma análise RAM feita via BlockSim e a disponibilidade da linha real será obtida através do sistema MES da organização.

Figura 4.14 – RBD da linha de pelotamento 01



Fonte: O autor (2019)

No modelo de blocos no BlockSim, previamente apresentado em tópicos anteriores, foi inserido um bloco de chamado “Preventiva_1”. Este bloco tem a função de disparar os eventos anuais de manutenção preventiva que fazem parte da política de manutenção para a linha estudada. É um bloco programado para falhar a cada

período de 365 dias e funciona como um mero gatilho para iniciar as atividades de manutenção preventiva configurada nos blocos dos componentes, como é mostrado na figura 4.15.

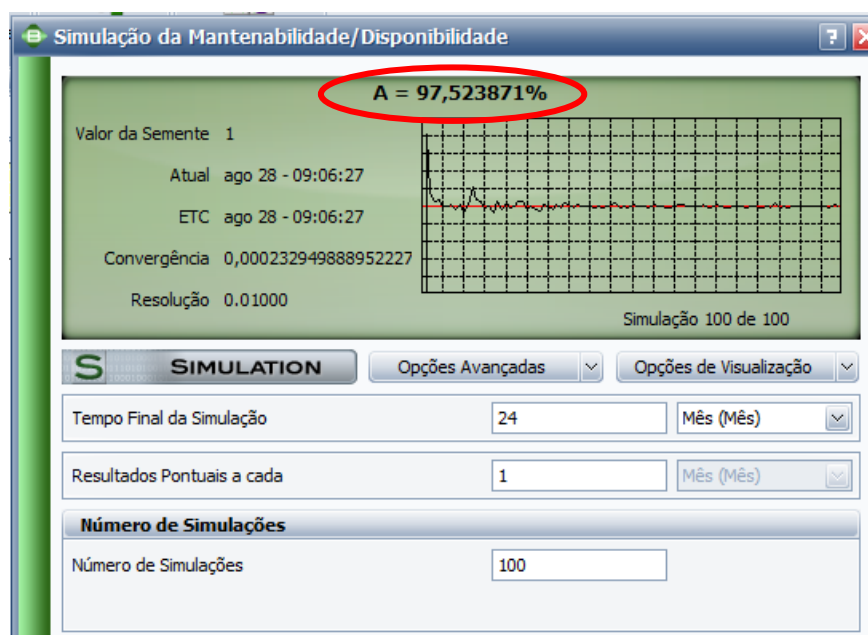
Figura 4.15 - URD do bloco Preventiva_1

Definição Universal de Confiabilidade (URD)	
URD	Preventiva_URD_7
Modelo - Confiabilidade (Dia)	Preventiva_Modelo_11 [NOR (365, 0,0001)]
Ação Corretiva	Preventiva_Ação Corretiva_6
- Iniciar Tarefa Corretiva	Na Falha do Item
- Duração (h)	Preventiva_Modelo_12 [0,01]
Equipes	
- Nenhuma Equipe foi selecionada.	
- Estoque de Sobressalentes	Padrão - Nenhum
Tarefas Programadas	
- Nenhuma Tarefa de Manutenção Programada foi selecionada.	

Fonte: O autor (2019)

Ao se rodar a simulação durante um período de 24 meses, obteve-se o resultado de disponibilidade estimada mostrado na figura 4.16.

Figura 4.16 - Disponibilidade estimada para linha de pelotamento 01



Fonte: O autor (2019)

Ao se consultar o período estudado no sistema MES da organização, obtém-se o valor de disponibilidade real para a linha de pelotamento 01 mostrado na figura 4.17.

Figura 4.17 - Disponibilidade real da linha de pelotamento 01

	DispOperacional ▲ ◆	DispReal ▲ ◆	DispIntrínseca ▲ ◆
1	97,5	97,5	99,13

Fonte: O autor (2019)

A disponibilidade real encontrada foi de 97,5%, bem próximo à disponibilidade simulada na análise RAM, que foi de 97,52%. Portanto, comparando-se ambos valores de disponibilidade, o simulado e o real, conclui-se que o modelo levantado é satisfatório.

Uma vez atestada a acurácia do modelo da linha de pelotamento 01 e buscando uma simplificação na atividade de coleta de dados, foi assumido que todas as outras linhas de pelotização possuem os mesmos comportamentos de falha e manutenibilidade em seus componentes.

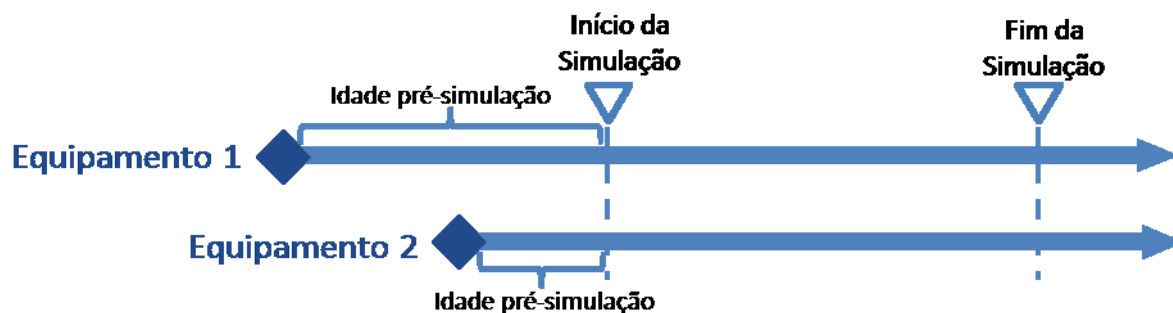
4.6 PARAMETRIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO

A simulação do *RBD* que representa a unidade de pelotamento trará os resultados esperados para o estudo em questão, entretanto, é necessário parametrizar a simulação corretamente.

Como citado no tópico 4.4, cada linha de pelotamento passa por manutenções preventivas anuais. Nestas manutenções são realizados serviços significativos, quase equiparando-se a um *overhaul*. Embora as manutenções possuam frequências idênticas, as mesmas não acontecem simultaneamente, ou seja, as manutenções têm fases diferentes.

Isto significa que no início do período de simulação, os equipamentos de cada linha terão idades diferentes entre si quando considerada a última manutenção preventiva. Esta diferença de idade causa um efeito especial nos itens que saem desta manutenção geral com o status “*as good as new*”. Este efeito é demonstrado na figura 4.18.

Figura 4.18 – Diferenças de idades pré-simulação entre dois componentes diferentes



Fonte: O autor (2019)

Para lidar com o efeito das idades pré-simulação diferentes dos componentes, cada linha deve ser parametrizada com a “*idade atual*” igual a idade pré-simulação citada seguindo os parâmetros da tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Idades pré-simulações de cada linha de pelotamento

LINHA	IDADE PRÉ-SIMULAÇÃO (DIAS)
Pelotamento 1	351
Pelotamento 2	318
Pelotamento 3	287
Pelotamento 4	255
Pelotamento 5	223
Pelotamento 6	191
Pelotamento 7	159
Pelotamento 8	127
Pelotamento 9	95
Pelotamento 10	63
Pelotamento 11	31

Fonte: O autor (2019)

Outra informação importante a ser passada para o modelo são os dados de produção dos itens, como mostrado na figura 4.19.

Figura 4.19 – Dados de produção do bloco



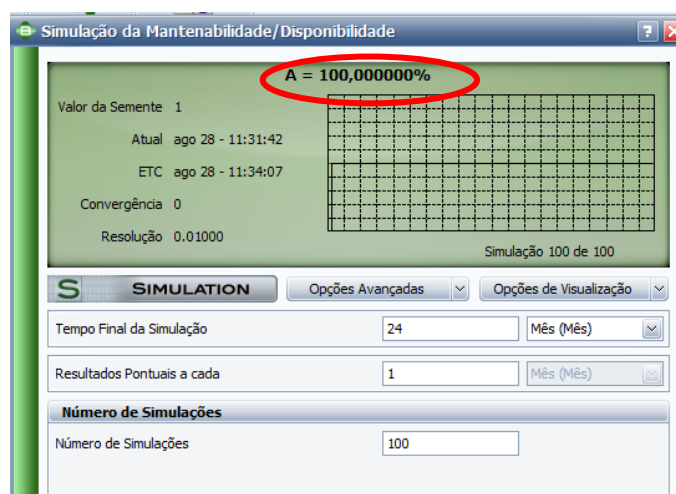
Fonte: O autor (2019)

Cada linha possui uma capacidade nominal de processamento de 122 toneladas/horas. A produção deve ser alocada mediante a capacidade de cada caminho, e não dividida igualmente entre as linhas. Além disso, não há um silo ou pulmão de produção caso a linha pare, por isso ela deve ignorar a reserva de produção que foi criada devido às paradas das mesmas.

4.7 SIMULAÇÃO DO MODELO

Após todos os componentes da unidade de pelotamento terem seus comportamentos de falha e de manutenibilidade devidamente carregados, assim como as informações de manutenção preventiva e as idades pré-simulação de cada componente, é realizada a análise RAM no BlockSim conforme mostrado na figura 4.20.

Figura 4.20 – Resultado de disponibilidade da análise RAM do sistema



Fonte: O autor (2019)

Como era de se esperar, o resultado de disponibilidade do sistema para o período analisado foi 100%. Isso se deve ao fato de que as linhas que compõem a unidade de pelotamento foram dispostas em paralelo no BlockSim e não há momento algum onde todas as linhas entram em falha simultaneamente.

Como explicado no item 4.1, o método de contabilização da disponibilidade que a organização estudada adota é peculiar para esta unidade de pelotamento. Sendo assim, a única maneira de calcular a disponibilidade operacional deste sistema é através dos montantes de produção, ao invés da comparação entre o tempo operando e o tempo parado.

Neste contexto, a disponibilidade ponderada da unidade no período considerado passa a ser:

$$\text{Disponibilidade Física} = \frac{\text{Produção Real da Unidade no Período}}{\text{Produção Nominal da Unidade no Período}}$$

Esta variável coincide com a métrica nativa do BlockSim denominada “*Utilização Real*”, que é a relação entre a produção total do sistema simulado e a capacidade máxima de produção deste sistema. Quando utilizada esta métrica a “*disponibilidade*” considerada pela organização passa a ser **99,76%** no período considerado.

Tabela 4.14 – Resultado da “disponibilidade ponderada” estimada pela simulação RAM

Produção	
Produção Total:	21322982,94
Máx. Capacidade:	21374400
Utilização Real:	99,76%

Fonte: O autor (2019)

Comparando-se à disponibilidade real registrada na unidade de pelotamento temos:

Tabela 4.15 – Resultado da disponibilidade ponderada real histórica para o sistema de pelotamento

	DispReal ▲ ◆	DispIntrínseca ▲ ◆	UsoDispOperacional ▲ ◆
1	97,58	99,16	91,87

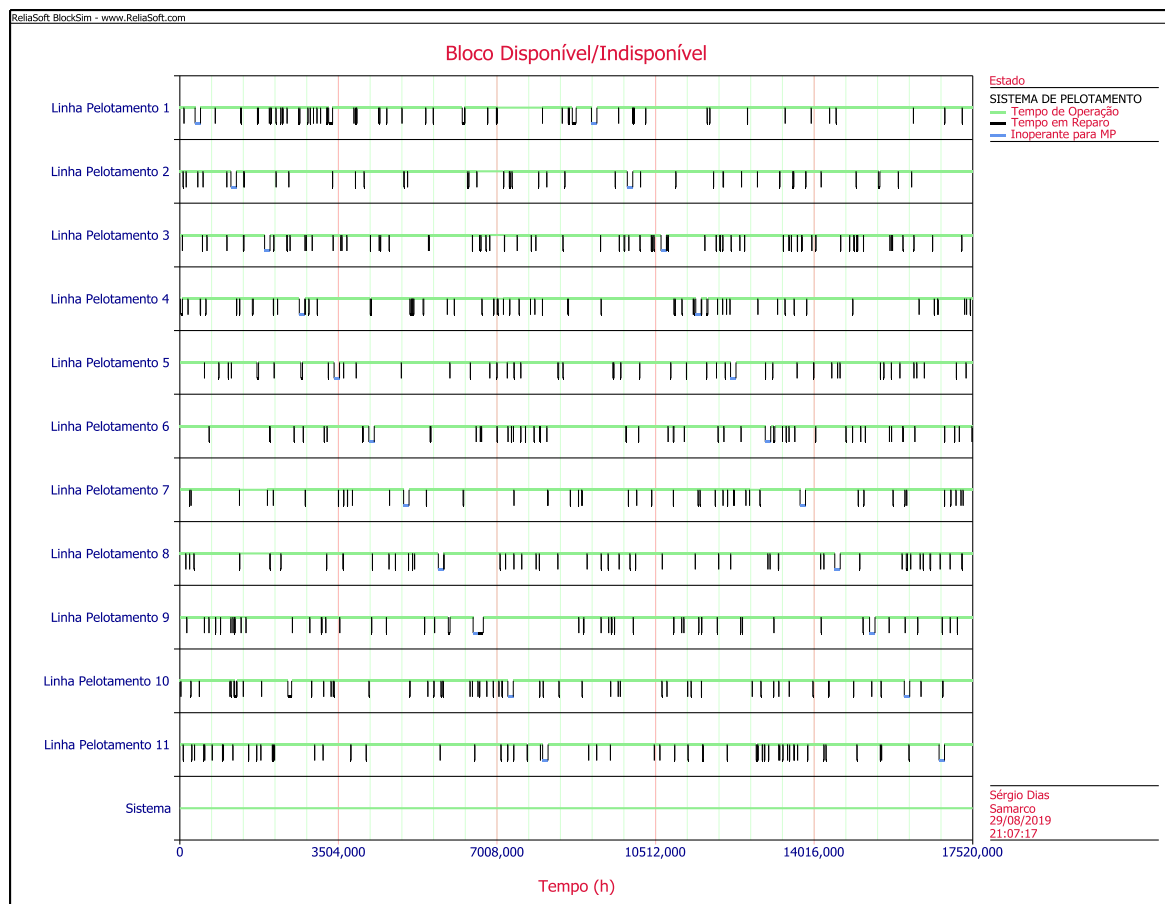
Fonte: O autor (2019)

Neste caso usa-se a disponibilidade real intrínseca para comparação com o valor simulado. Isto se deve ao fato de que a disponibilidade real da unidade de pelotamento é prejudicada pela parada de outras linhas adjacentes através de “*interlock*”, o que não pode ser considerado um evento interno ao pelotamento.

Portanto, observa-se certa diferença entre a disponibilidade simulada e a disponibilidade histórica real (99,76% contra 99,16%). Esta diferença é devida ao fato de que apenas uma linha de pelotamento, dentre as onze linhas, teve o comportamento de falha e de manutenibilidade realmente levantados através de dados históricos. As outras dez linhas assumiram o mesmo comportamento para a simulação por questões práticas deste trabalho. O levantamento de dados das outras dez linhas consumiria recurso de tempo excessivo e não contribuiria para o conteúdo acadêmico deste material.

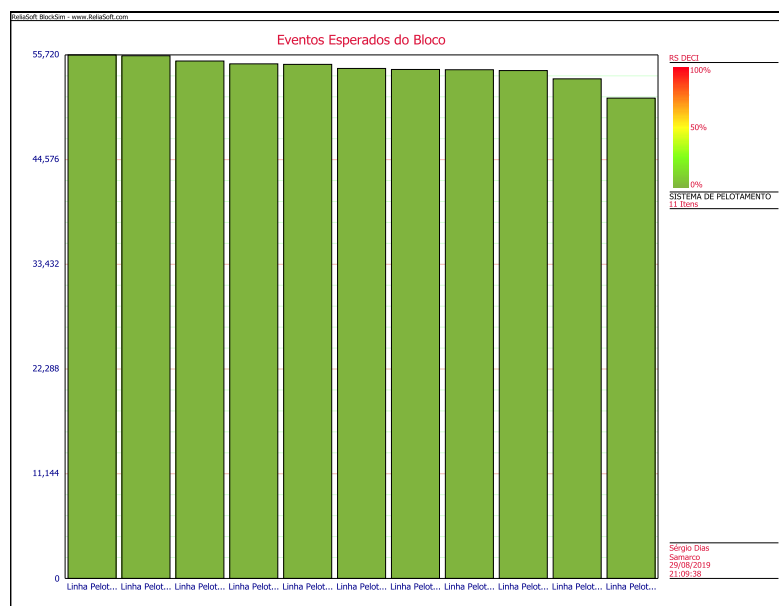
Importante destacar que o nível de produção informado pela simulação RAM na tabela 4.14, ou seja, 21 milhões de toneladas, é fictício e serve apenas ao propósito do cálculo da “disponibilidade ponderada”. Numa análise real de níveis de produção, diversos outros parâmetros como rendimento, eficiência e utilização deveriam ser utilizados para modelar uma linha de produção a fim de se obter a produção total do período. Este não é o escopo deste trabalho e, dependendo dos requisitos desta análise, seriam necessárias ferramentas que transcendem as capacidades do BlockSim.

Figura 4.21 – Mapa de paradas das linhas de pelotamento ao longo do período simulado



Fonte: O autor (2019)

Figura 4.22 – Quantidade de eventos de falha esperados por linha de produção

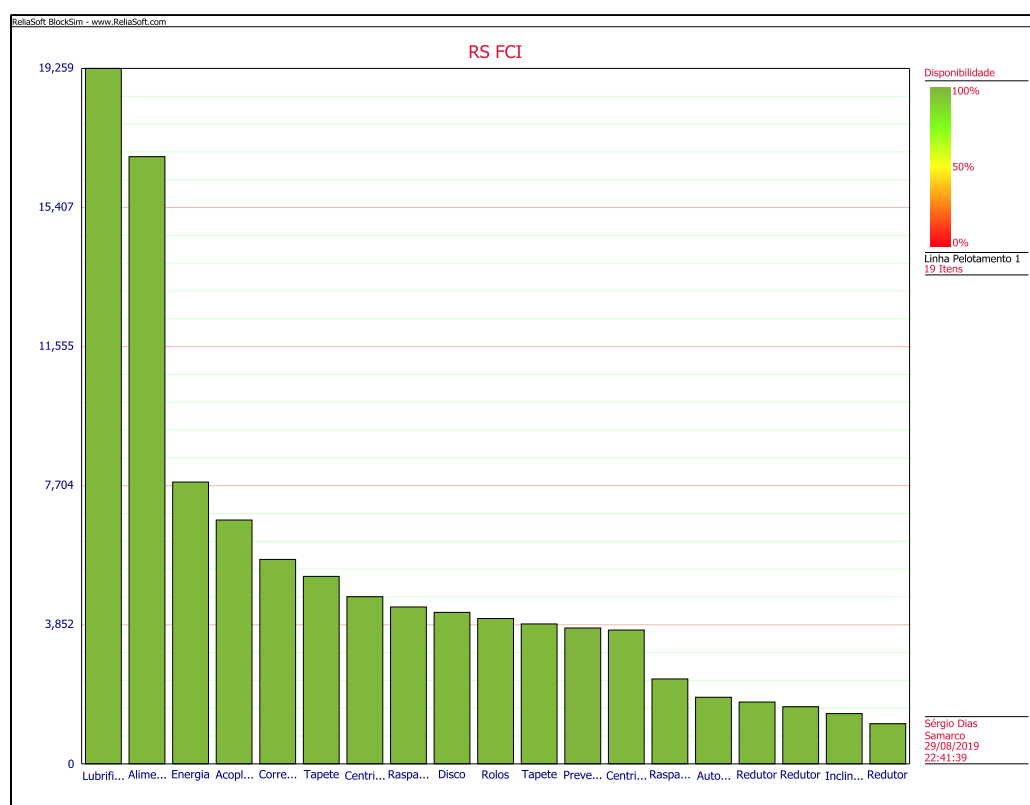


Fonte: O autor (2019)

Importante lembrar que a unidade de pelotamento, como um todo, não falha durante todo o período simulado. Isto se deve ao fato de suas linhas de pelotamento estarem ligadas em paralelo e, para que a unidade falhe, todas as onze linhas de pelotamento deveriam falhar simultaneamente em algum momento, o que não acontece. Portanto, não é possível calcular automaticamente métricas clássicas de análise RAM como o *FCI* (*Failure Criticality Index*), o *DECI* (*Downing Event Criticality Index*) e o *DTCI* (*Downtime Criticality Index*).

Entretanto, é possível calcular estes indicadores para as linhas individualmente. Como apenas a linha de pelotamento 01 foi modelada, e seu modelo foi replicado para as outras linhas, a mesma deve ser analisada através das métricas após análise RAM.

Figura 4.23 – Indicador FCI para linha de pelotamento 01

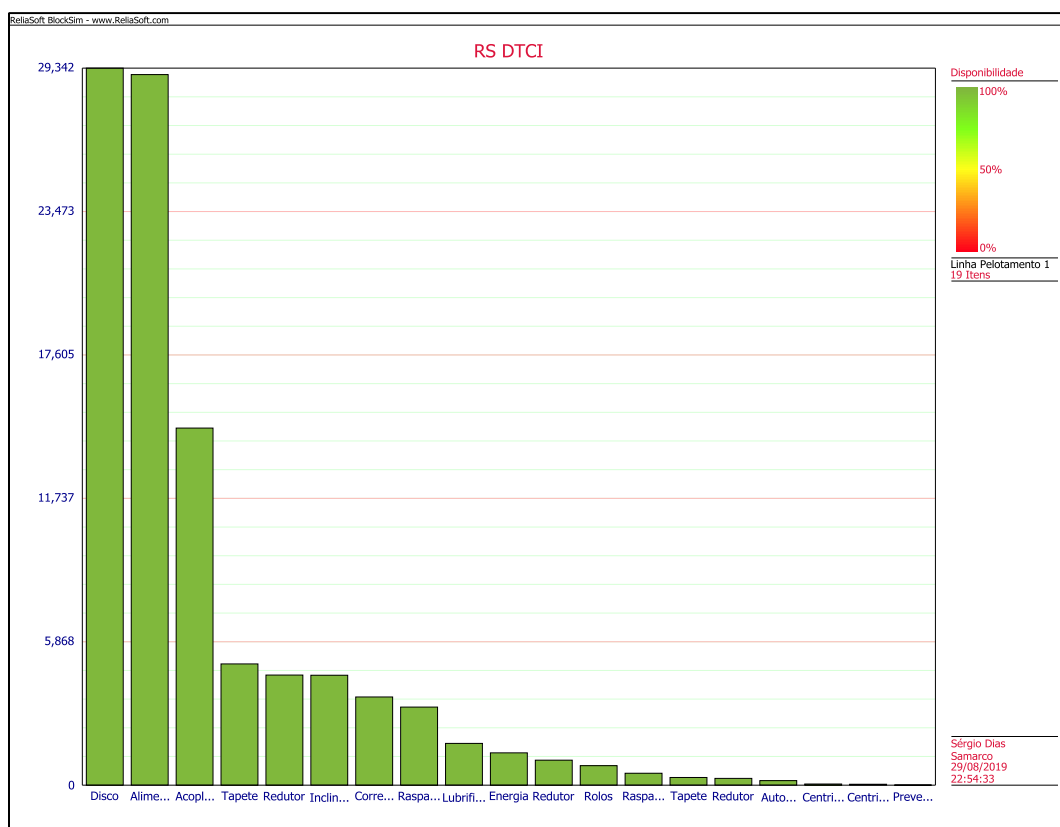


Fonte: O autor (2019)

O índice *FCI* (*Failure Criticality Index*) mostra a contribuição percentual de cada bloco no número de falhas do sistema. Em outras palavras, é a quantidade de falhas no período de cada bloco dividida pela quantidade de falhas do sistema.

Neste indicador é possível observar que a lubrificação e o alimentador possuem papel importante na quantidade de paradas do sistema, respondendo, juntos, por 36% das paradas. Isto se deve à necessidade constante de calibração do alimentador e às falhas de intervenção contínuas na lubrificação do disco.

Figura 4.24 – Indicador DTCl para linha de pelotamento 01

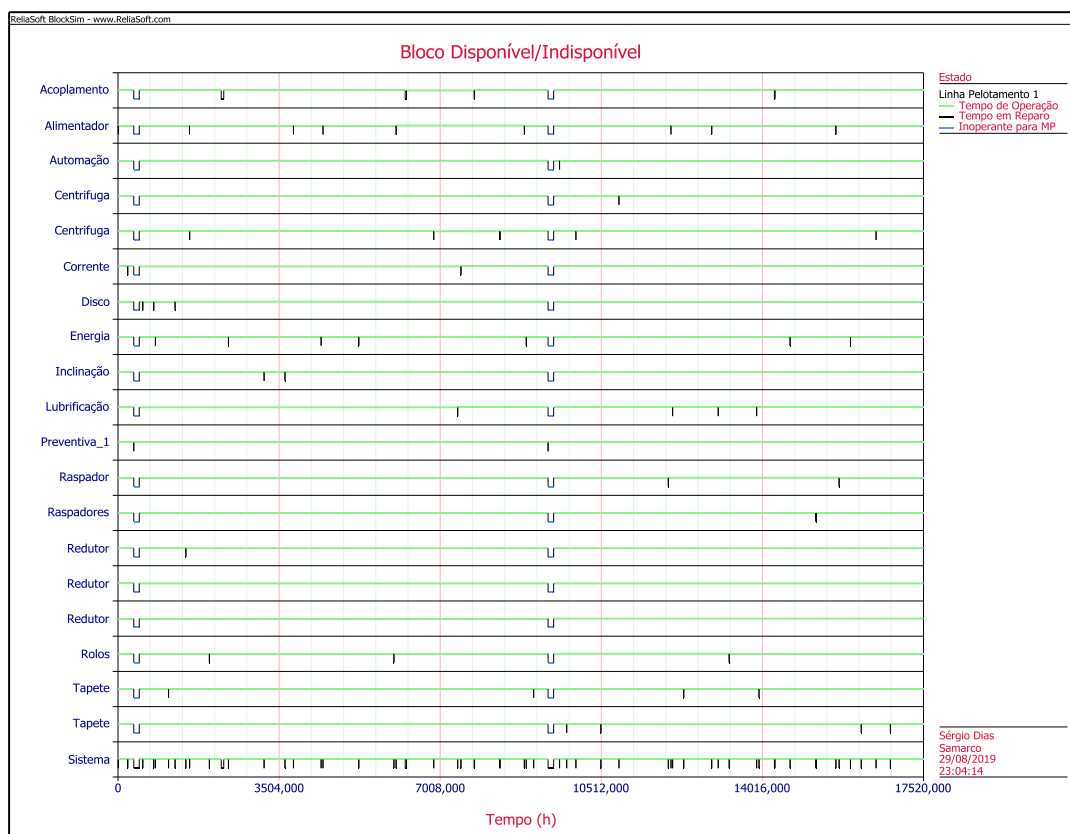


Fonte: O autor (2019)

O índice *DTCl* (*Downtime Criticality Index*) mostra a contribuição percentual de cada bloco no tempo de falha do sistema. Em outras palavras, é o tempo de falha de cada bloco dividido pelo tempo total de paradas do sistema.

Desta vez, três blocos se destacam. O disco, o alimentador e o acoplamento. Embora pouco frequentes, as falhas no disco e acoplamento levam altos tempos de intervenção devido às características mecânicas do equipamento.

Figura 4.25 – Mapa de paradas da linha de pelotamento 01



Fonte: O autor (2019)

Através do mapa de falhas é possível verificar a distribuição das falhas ao longo do tempo, na linha de pelotamento 01, para cada bloco. Observa-se dois períodos de manutenção preventiva conforme programado no *RBD* quando todos os blocos param simultaneamente. Como já descrito em tópicos anteriores, ao final destas paradas preventivas, cada componente sai com uma condição diferente, alguns “*as good as new*” outros “*as bad as old*”, dependendo do tipo de tarefa de manutenção que é aplicada a cada um dos blocos.

Tabela 4.16 – Dados da simulação RAM da linha de pelotamento 01

Visão Geral do Sistema	
Geral	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,975239
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,004003
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,988936
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 17520:	0,98
Confiabilidade(17520):	0
Quantidade Esperada de Falhas:	53,17
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	7,34442
TMAPF (h):	98,97685
MTBF (Tempo Total) (h):	329,509122
MTBF (Tempo de Funcionamento) (h):	321,35005
MTBE (Tempo Total) (h):	317,621465
MTBE (Tempo de Funcionamento) (h):	309,756747
Tempo Disponível/Indisponível do Sistema	
Tempo Disponível (h):	17086,18214
Tempo Indisponível da MC (h):	193,837861
Tempo Indisponível da Inspeção (h):	0
Tempo Indisponível MP (h):	239,98
Tempo Indisponível da OC (h):	0
Downtime de Espera (h):	0
Tempo Indisponível Total (h):	433,817861
Eventos com Parada do Sistema	
Número de Falhas:	53,16
Quantidade de MCs:	53,16
Quantidade de Inspeções:	0
Quantidade de MPs:	2
Quantidade de OCs:	0
Quantidade de Eventos OFF por Gatilho:	0
Total de Eventos:	55,16

Fonte: O autor (2019)

Por fim, para o período simulado, são esperadas 53 falhas para este sistema, com um MTBF de 321 horas (13 dias) e um total de 433 horas (18 dias) de indisponibilidade, incluindo-se as manutenções preventivas.

4.8 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A simulação mostrou que os três componentes que mais impactam na disponibilidade do sistema estão todos relacionados ao disco de pelotamento e são: o disco (parte mecânica do disco), o alimentador e o acoplamento.

Na seção 4.4.1 foi possível observar que o disco sofre de falhas prematuras, provavelmente relacionadas ao método de manutenção empregado, o que pode requerer ações de melhoria de treinamento de pessoal ou ações de engenharia.

Entretanto, os componentes alimentador e acoplamento sofrem de falhas por desgaste, ou idade, podendo requerer intervenções preventivas ou uma frequência de inspeção que respeite a previsão de falha do item.

5 CONCLUSÃO

Como citado em tópicos anteriores, o objetivo deste trabalho não é propor a identificação de maus atores e a consequente melhoria de seus desempenhos. A proposta deste material é modelar o *RBD* de um sistema existente permitindo a aferição de sua acurácia quando comparado aos dados históricos.

Com este intuito, concluiu-se que o método utilizado para o levantamento do modelo foi satisfatório, pois as variáveis de comparação (disponibilidade simulada e disponibilidade ponderada real) utilizadas para a validação do diagrama resultaram em valores equiparáveis.

Tabela 5.1 – Comparação entre valores de disponibilidade

Disponibilidade da linha de pelotamento 01	
Modelo	Histórico Real
97,52%	97,5%

Disponibilidade Ponderada da Unidade de Pelotamento	
Modelo	Histórico Real
99,16%	99,76%

Fonte: O autor (2019)

A linha de pelotamento 01 foi modelada com dados reais e resultou em valores de disponibilidade praticamente idênticos. Entretanto, as características de falha e manutenibilidade desta linha foram expandidas para as outras 10 linhas de pelotamento no momento da construção do sistema completo no BlockSim, o que trouxe um erro na comparação final entre as disponibilidades ponderadas do modelo e a real. Isto se deve ao fato de que existem diferenças sutis entre o comportamento de falha das outras linhas.

A princípio, o modelamento de um *RBD* de uma linha de produção existente com vários anos de histórico parece um contrassenso. Afinal, os resultados de disponibilidade que sairão deste modelo já são amplamente conhecidos através do

histórico de operação. Da mesma maneira, os maus atores podem ser identificados através da aplicação de ferramentas estatísticas mais simples ao histórico, como histogramas ou diagramas Pareto.

Entretanto, a modelagem de um *RBD* para sistemas existentes permite que se conheça as relações de disponibilidade, de produção (*throughput*) e a contribuição que cada modo de falha dá ao sistema. Isto possibilita a tomada de decisões sobre quais modos de falha atuar, na medida que é possível mensurar o ganho financeiro desta atuação quando comparado ao custo da intervenção neste modo de falha específico.

Para sistemas complexos, podem existir situações nas quais a eliminação ou mitigação de um modo de falha específico pode consumir grandes investimentos, porém a capacidade produtiva que este bloco passará a liberar ficará retida, mais à frente no diagrama, por algum outro modo de falha cuja melhoria deveria ter sido priorizada. O *RBD* e a análise RAM demonstram este efeito rapidamente durante a simulação.

Além disso, o *RBD* bem construído permite a tomada de decisões de postergação de manutenções em caso de concorrência de mão de obra na organização ou na ocasião de uma necessidade de extensão da campanha operacional para atendimento a uma meta de produção específica. O modelo irá permitir a quantificação do risco adicional ao qual os ativos estarão submetidos.

Entretanto, existem limitações neste tipo de trabalho. Um *RBD* construído com base em dados históricos de operação efetivamente está descrevendo um sistema que já possui uma rotina de manutenções preventivas e corretivas bem estabelecidos na maioria das vezes. Portanto, é possível que neste sistema analisado existem vários modos de falha que nunca se manifestaram nos históricos devido ao fato de estarem continuamente sendo impedidos de acontecer nas manutenções existentes no sistema.

Portanto, decisões como o espaçamento entre os tempos de manutenção preventivas podem resultar no aparecimento de modos de falha não mapeados. Isto não quer dizer que o modelo estava incorreto, mas sim que o sistema foi submetido a uma condição nunca experimentada pelos registros históricos.

Devido a este fato, é ideal que o levantamento de um *RBD* não se atenha apenas aos dados históricos reais da linha, mas também lance mão de técnicas como elicitación de experts, análise de degradação e ensaios acelerados. Estas técnicas

servem para inserir no diagrama, modos de falha não manifestados durante o histórico normal de operação, mas podem aparecer em casos de mudança de contexto operacional.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros, e que constituem os desdobramentos comuns de uma análise RAM, podem ser conduzidos. Dentre eles, podem ser citados:

- Modelamento das características de confiabilidade e manutenibilidade das outras 10 linhas de pelotamento conforme registros históricos;
- Identificação dos “maus atores” do sistema de pelotamento e sugestões de melhoria para aumento da disponibilidade;
- Análises de degradação, ensaios acelerados e eliciações para incluir no modelo modos de falha que não aparecem nos registros históricos devido às manutenções preventivas em curso;
- Definições de intervalos ótimos de manutenção preventiva.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade**. [S.l.]: [s.n.], 1994.

BRASIL, K. D. **Produtos e Serviços**, 30 out. 2019. Disponível em: <<https://www.tecnometal.com.br/>>.

DEPARTMENT OF DEFENSE - DEFINITIONS OF TERMS FOR RELIABILITY AND MAINTENABILITY. **MIL-STD-721C**. [S.l.]: [s.n.], 1981.

EQUIPAMENTOS, H. **Correia Transportadora**, 30 out. 2019. Disponível em: <<http://www.hacoequipamentos.com.br/correia-transportadora>>.

FERREIRA, J.; CALLOU, G.; MACIEL, P. A Power Load Distribution Algorithm to Optimize Data Center Electrical Flow. **Energies**, 15 jul. 2013. 23.

FERREIRA, J.; RAU DE ALMEIDA CALLOU, G.; ROMERO MARTINS MACIEL, P. A Power Load Distribution Algorithm to Optimize Data Center Electrical Flow. https://www.researchgate.net/publication/256973348_A_Power_Load_Distribution_Algorithm_to_Optimize_Data_Center_Electrical_Flow, 2013.

FONSECA, V. O. **Envelhecimento de Pelotas de Minério de Ferro com Diferentes Basicidades e Teores de MgO**. Universidade Federal de Ouro Preto: Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14.224 - Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

INVESTING.COM. Minério de ferro refinado 62% Fe CFR. **Commodities Trend**, 30 out. 2019. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/iron-ore-62-cfr-contracts>>.

RELIAWIKI. **Introduction to Repairable Systems**, 30 out. 2019. Disponível em: <http://reliawiki.com/index.php/Introduction_to_Repairable_Systems>.

TREACY, M.; WIERSEMA, F. **Discipline of Market Leaders**. Estados Unidos: Addison-Wesley, 1995.

VALE. **Sobre a Vale**, 30 out. 2019. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/voce-sabe-o-que-e-pelotizacao.aspx>>.

WEIBULL.COM. Statistical Analysis Using the Weibull Model and Other Lifetime Distribution. **Reliability Life Data Analysis**, 30 out. 2019. Disponível em: <<https://www.weibull.com/basics/lifedata.htm>>.

WEIBULL.COM. Steps in System Reliability, Availability and Maintainability Simulation Analysis. **Reliability Basics**, 30 out. 2019. Disponível em: <<https://www.weibull.com/hotwire/issue103/relbasics103.htm>>.