

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNO RIBEIRO DO PRADO
NÍCOLAS FELIPE SILVA SANTOS**

**METODOLOGIA DE PROJETOS PARA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS
DISCRETOS VIA SIMULAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2019**

**BRUNO RIBEIRO DO PRADO
NÍCOLAS FELIPE SILVA SANTOS**

**METODOLOGIA DE PROJETOS PARA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS
DISCRETOS VIA SIMULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

**CURITIBA
2019**

Bruno Ribeiro do Prado
Nícolas Felipe Silva Santos

Metodologia de projetos para confiabilidade de sistemas discretos via simulação

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 20 de novembro de 2019.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Carlos Henrique Mariano, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Carlos Henrique Mariano, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Erley Schafranski, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Rodrigues, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

DO PRADO, Bruno Ribeiro. SANTOS, Nicolas Felipe Silva. **METODOLOGIA DE PROJETOS PARA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DISCRETOS VIA SIMULAÇÃO**. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Elétrica), Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2019.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de projeto para a confiabilidade de sistemas discretos via simulação. O trabalho parte do princípio da escassez de dados de confiabilidade dos elementos da linha de produção estudada e, por meio da revisão de literatura técnica da área, combinando com obtenção de indicadores do mercado (*benchmarking*) e valendo-se apenas de informações disponíveis nos catálogos de vendas, como o preço e tempo de garantia, chegou-se a uma metodologia aplicável para definição a priori das distribuições de falha e reparação dos componentes da linha. Após criação de um modelo de simulação baseado em blocos de confiabilidade simulou-se o sistema para 10 anos de operação obtendo-se uma disponibilidade de 86,66% e os componentes, cujas falhas mais contribuíram para a parada do sistema, foram a inspeção eletrônica e a válvula eletrônica. Com isto concluiu-se que medidas devem ser aplicadas a estes componentes para que a disponibilidade geral do sistema seja melhorada.

Palavras-chave: Confiabilidade. Simulação. Sistemas. *Benchmarking*. Projeto.

ABSTRACT

DO PRADO, Bruno Ribeiro. SANTOS, Nicolas Felipe Silva. **METHODOLOGY TO DESIGN FOR RELIABILITY OF DISCRETE SYSTEMS BY SIMULATION.** 91 f. Term paper (Degree in Electrical Engineering), Academic Department of Electrical, Federal Technological University of Paraná. Curitiba. 2019.

This paper presents the development of a methodology to design for reliability of discrete systems by simulation. The work begins from the principle of scarcity of reliability data of the elements of the production line studied and, through the revision of technical literature of the area, presents a manner of combining obtaining market indicators (benchmarking) and using only available information of sales catalogs, such as price and warranty time, it results in a methodology that is applied to an *a priori* definition of fault and repair distributions of elements of the line. After creating a reliability block-based simulation model, the system was simulated for 10 years and a 86.66% availability was obtained and the components, whose failures most contributed to the system shutdown, were electronic inspection and the electronic valve. With this it was concluded that measures should be applied to these components in order to improve overall system availability.

Keywords: Reliability. Simulation. Systems. Benchmarking. Design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Análise para garantia de confiabilidade.....	13
Figura 2 – Metodologia do trabalho realizado.....	16
Figura 3 – Representação esquemática dos elementos de um processo individual	18
Figura 4 – Representação gráfica do tempo até a falha.....	20
Figura 5 – Curva da banheira.....	21
Figura 6 – Representação gráfica do tempo até a falha.....	22
Figura 7 – Estados de operação no tempo.....	24
Figura 8 – Formas de se estudar um sistema.....	33
Figura 9 – Fluxograma etapas de verificação e validação.....	38
Figura 10 – Interface gráfica do software ARENA.....	40
Figura 11 – Estações de trabalho e opções de fluxo para a entidade.....	41
Figura 12 – Interface gráfica do software BlockSim.....	43
Figura 13 – <i>Template</i> Engarrafadora do ARENA.....	49
Figura 14 – Diagrama de Blocos Engarrafadora.....	49
Figura 15 – Tempo de Garantia Calculado Bloco Esteira com $\beta = 1,9$ e $\eta = 12500$	51
Figura 16 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Lavadora com $\beta = 2,2$ e $\eta = 11900$	51
Figura 17 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Inspeção Eletrônica com Exponencial = 17200.....	52
Figura 18 – Tempo de Garantia Calculado Válvula Eletrônica com Exponencial = 17200.....	52
Figura 19 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Lavadora com $\beta = 2,2$ e $\eta = 23800$	53
Figura 20 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Embalador com $\beta = 1,3$ e $\eta =$ 14750.....	54
Figura 21 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Empacotador com $\beta = 1,5$ e $\eta =$ 13700.....	54
Figura 22 – Disponibilidade e Falhas Ocorridas em Cada Bloco do Sistema.....	56
Figura 23 – Distribuições de Reparo Bloco Esteira.....	57
Figura 24 – Distribuições de Reparo Bloco Lavadora.....	58
Figura 25 – Distribuições de Reparo Bloco Inspeção Eletrônica.....	59
Figura 26 – Distribuições de Reparo Bloco Válvula Eletrônica.....	59
Figura 27 – Distribuições de Reparo Bloco Envasadora.....	60
Figura 28 – Distribuições de Reparo Bloco Embalador.....	61
Figura 29 – Distribuições de Reparo Bloco Empacotador.....	62
Figura 30 – Confiabilidade x Tempo.....	64
Figura 31 – Densidade de Falhas.....	65
Figura 32 – pdf do Bloco x Tempo.....	66
Figura 33 – Confiabilidade do Bloco x Tempo.....	67
Figura 34 – Confiabilidade Pontual x Tempo.....	67
Figura 35 – Taxa de Falha x Tempo.....	68
Figura 36 – Falhas do Sistema.....	69
Figura 37 – Taxa de Falha do Bloco.....	70
Figura 38 – Probabilidade de Falha do Bloco x Tempo.....	70
Figura 39 – Falhas Esperadas do Bloco.....	71

Figura 40 – RS FCI	72
Figura 41 – RS DECI	73
Figura 42 – RS DTCl	74
Figura 43 – Disponibilidade/Indisponibilidade do Sistema.....	75
Figura 44 – Disponibilidade Média	76
Figura 45 – Simulação da Manutenibilidade/Disponibilidade do Sistema.....	76
Figura 46 – Tempo Indisponível de Cada Bloco	77
Figura 47 – Custo x Tempo.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – História do uso da simulação computacional.....	27
Quadro 2 – Custo por reparo	62
Quadro 3 – Sets de Falha e Reparo utilizados em cada bloco	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	TEMA.....	11
1.1.1	Delimitação do tema.....	12
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.3.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	14
1.4	JUSTIFICATIVA.....	14
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	CONTEXTO DA QUALIDADE	18
2.1.1	Análise RAM – Definições e Conceitos	19
2.2	SIMULAÇÃO.....	26
2.2.1	O QUE É SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	26
2.2.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	28
2.2.3	SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS.....	30
2.3	SISTEMAS	32
2.4	MODELOS.....	33
2.4.1	TIPOS DE MODELOS.....	33
2.4.2	ETAPAS DE MODELAGEM DE UM SISTEMA	36
2.5	SOFTWARES.....	39
2.5.1	O SOFTWARE ARENA	39
2.5.2	O SOFTWARE RELIASOFT SYNTHESIS PLATAFORM.....	42
2.5.3	BLOCKSIM	43
3	PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE FALHA E DE REPARO DOS COMPONENTES DO SISTEMA E CUSTOS.....	44
3.1	DISTRIBUIÇÕES DE FALHAS	44
3.1.1	Passos para obtenção das distribuições de falhas dos componentes ou subsistemas;.....	44
3.2	DISTRIBUIÇÕES DE REPARO E INTERVALO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	45
3.2.1	Tempo entre manutenções preventivas	46
3.3	CUSTO DE MANUTENÇÃO.....	47
4	METODOLOGIA APLICADA	48

4.1	OBJETO DE ESTUDO	48
4.2	METODOLOGIA.....	50
4.2.1	DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE FALHA.....	50
4.2.2	DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE REPARO	55
4.2.3	DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO.....	62
5	RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA.....	64
6	CONCLUSÃO	79
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	80

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Scapin (1999), a confiança tornou-se um item obrigatório e necessário às empresas que desejam atender melhor seus clientes, já que a confiabilidade está diretamente ligada à percepção da qualidade. Conforme a norma NBR 5462 (1994), confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

Segundo Fogliatto (2009), com o advento da economia globalizada, observou-se um aumento na demanda por produtos e sistemas de melhor desempenho a custos competitivos. Concomitantemente, surgiu a necessidade de redução na probabilidade de falhas em produtos, o que resultou numa ênfase crescente em sua confiabilidade. Nesse contexto, a confiabilidade se torna, portanto, uma das características da qualidade mais importantes para que as empresas se mantenham competitivas no mercado.

A engenharia da confiabilidade é uma disciplina científica que estuda os processos, atividades e fatores relacionados com a habilidade de um produto manter sua funcionabilidade durante o tempo de operação e os métodos para sua realização, previsão, avaliação e melhoria. Para citar algumas das metodologias relacionadas na gestão de ativos apoiada pela engenharia da confiabilidade, pode-se incluir a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*), Análise de Dados de Vida (LDA – *Living Data Analysis*), Ensaio Acelerado de Vida, Árvore de Falhas, Análise de Causa Raiz (RCA – *Root Cause Analysis*), Análise de Sistemas Reparáveis e Não Reparáveis, entre outros.

A atenção dos estudos quantitativos de confiabilidade recai sobre dois tipos distintos de sistemas: reparáveis e sistemas não reparáveis. De acordo com Rigdon e Basu (2000) um sistema reparável é aquele que, após a ocorrência de uma falha, pode ser retornado à condição de operação através de um reparo. Já sistemas não reparáveis são descartados e substituídos após a primeira e única falha.

1.1 TEMA

A partir dos anos 90, com a globalização da economia e a consequente expansão dos mercados, impositivos de confiabilidade, disponibilidade, entre técnicas, filosofias e métodos a manutenção se tornou um processo integrante da organização (MUNIZ, 2010).

Em meio a economia globalizada e de alta competitividade, a boa gestão dos custos de manutenção e de operação, são fatores importantes na busca pela melhora na produtividade e aumento da lucratividade de um ambiente industrial. Xenos (2004) relata que as fábricas estão se tornando cada vez mais automatizadas e complexas. Sendo assim, caso ocorra alguma interrupção em um sistema automático de alta produtividade, mesmo que seja pequena, pode-se causar prejuízos para a fábrica em questão. Portanto, para se manterem competitivas, as empresas devem garantir confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos pela gestão estratégica da manutenção (TSANG, 2002; RAPOSO, 2010).

Neste contexto, como considerar a confiabilidade e a manutenibilidade, a priori na fase do projeto do sistema? Isto significa que ações podem ser realizadas na fase de projeto que garantam melhores níveis de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade do sistema na sua futura operação. Segundo Dias (p. 4, 2003), estas ações devem possuir três aspectos a ser considerados:

“O primeiro está centrado (grifo nosso) na necessidade de dispor de uma metodologia de projeto que facilite a incorporação dos diversos atributos requeridos pelos ativos ao longo do ciclo de vida (Back, 1984; Blanchard e Fabrick, 1990; Back e Forcellini, 1997; Almeida, 1999). O projeto tem relevância estratégica, tanto para aumentar a confiabilidade do ativo num tempo requerido quanto para aumentar o tempo de vida além do inicialmente estabelecido. **A ação de manutenção apenas garante a confiabilidade definida no projeto (grifo nosso).** O segundo aspecto (grifo nosso) refere-se à classificação do ativo segundo o mercado de atuação. A Figura 1 sintetiza esta classificação, na perspectiva de apresentar um modelo de análise para a garantia da confiabilidade, em função do mercado e em função do produto. Esta análise está baseada na sistematização apresentada por Santos (2001), a partir dos estudos de Condra (1993) efetuados no uso de projeto de experimentos (*Design of Experiments-DoE*) para a melhoria da confiabilidade. Esta classificação contribui para considerar e selecionar a legislação vigente, as normas técnicas, o referencial de *benchmarking* e os fundamentos teóricos requeridos para a análise da confiabilidade e implementação das técnicas de controle que se quer trabalhar. Na verdade, é uma forma de hierarquizar os esforços no projeto do produto para a confiabilidade, no que se refere às exigências legais e normativas, em relação ao mercado e em relação ao produto. **O terceiro aspecto (grifo nosso)** está diretamente ligado ao produto e às informações que o caracterizam. Significa dizer que a consideração da confiabilidade depende da existência ou não de dados, informações. Sem estes o tratamento estatístico e probabilístico fica mais limitado.

Sendo assim ao se utilizar uma metodologia de projeto para confiabilidade espera-se determinar, a priori, o nível de tolerância do sistema às falhas não previstas sendo isto um dos principais desafios enfrentados pelos projetistas. De acordo com as escolhas feitas, pode-se reduzir os custos de manutenção, aumentar o desempenho, e disponibilidade do ativo e sua confiabilidade ou, até mesmo, piorar os problemas já existentes.

Considerando que se trata de um sistema desenvolvido para o mercado industrial muitos atributos¹ seriam necessários para se obter estimativas de operação mais fidedignas, porém a presente pesquisa abordará um processo de coleta de dados necessários para se estabelecer as distribuições de falhas dos componentes do sistema como também as distribuições de reparação, com ciência da existência de outras variáveis que não serão abordadas.

Portanto, o presente trabalho estará focado na obtenção dos modos de falha de todos os componentes ou daqueles que sejam considerados mais críticos no sistema em fase de projeto como também das distribuições do tempo de reparo dos componentes críticos do sistema. Para isso, os fabricantes podem desenvolver sistemas de coleta automática de falhas de protótipos, desenvolver ensaios acelerados de vida dos componentes, *benchmarking* de projeto ou utilizar simulações a partir de outra metodologia para determinar os parâmetros, como é o caso deste projeto.

1.1.1 Delimitação do tema

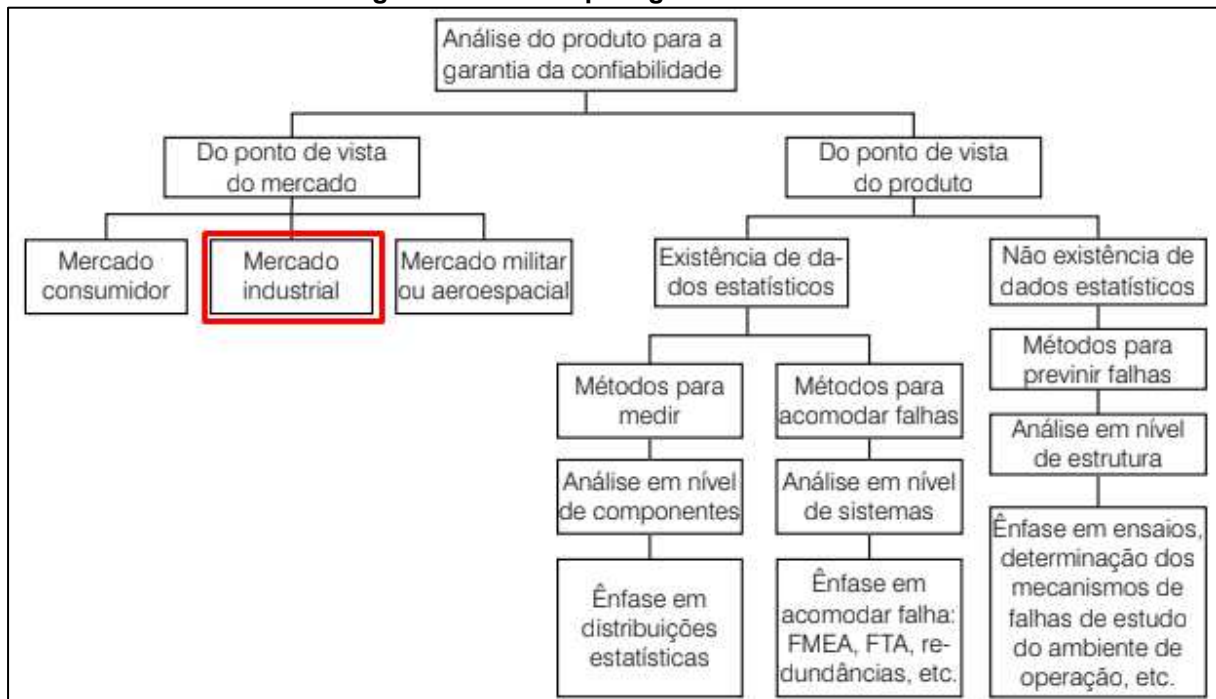
Na metodologia de projeto para confiabilidade do ativo, segundo as exigências do mercado, os produtos são classificados em três níveis; mercado consumidor, mercado industrial e mercado militar ou aeroespacial (DIAS, p. 5, 2003). O presente trabalho visa demonstrar a metodologia de projeto para a confiabilidade no contexto de mercado industrial para prever os comportamentos de falhas dos elementos de uma linha automatizada de uma engarrafadora, considerando uma cervejaria de médio porte com produção média de 2350 garrafas por hora (SATRAN, 2017), no que se refere as suas falhas programadas e não programadas,

¹ Tempos que caracterizam os parâmetros de operação de máquina, capacidade de armazenamento de produtos acabados, distribuições de movimentação logística, tempos de gargalo de operação na transição de máquinas dentre outros.

manutenções e custos associados por meio de dados obtidos via simulação, identificando também as ações no projeto que resultam no aumento de sua disponibilidade.

Para tal, de acordo com Dias (2005), se utilizará o conceito de confiabilidade na visão de mercado industrial (Figura 1).

Figura 1 – Análise para garantia de confiabilidade



Fonte: DIAS (2005)

Assim, a confiabilidade da linha está também associada qualidade final do produto.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Levando em consideração a metodologia de projeto para confiabilidade baseada no mercado industrial o problema que se deseja solucionar com este trabalho é a obtenção de dados para a realização das estimativas de confiabilidade e e disponibilidade do sistema. Para solucionar tal problema, optou-se pela obtenção dos dados a partir de simulações baseadas na experiência de projeto da equipe, informações presentes nos sítios de internet de venda de maquinário para o tipo de sistema adotado no projeto, bem como presentes na literatura técnica.

Assim, o projeto visa apresentar o uso da simulação baseada em diagramas de blocos de confiabilidade, a partir de dados comerciais dos elementos e da literatura técnica, como ferramenta de projeto para confiabilidade de linha de produção automatizada de uma engarrafadora.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia de projeto para confiabilidade para estimar a disponibilidade do sistema a partir de um processo de simulação baseada em diagramas de blocos de confiabilidade

1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Revisar a bibliografia sobre os conceitos de confiabilidade aplicada a projetos e confiabilidade via simulação;
- Escolher sistema industrial para estudo;
- Criar modelo de simulação do sistema industrial baseado em diagramas de bloco de confiabilidade para estimar os tempos de falha e de reparo dos ativos;
- Aplicar das estimativas de tempo de reparo e de falha no modelo de simulação do sistema industrial para determinação da disponibilidade;
- Simular e coletar os dados de resposta;
- Analisar as curvas (métricas) de confiabilidade e os gráficos de importância da confiabilidade obtidos.

1.4 JUSTIFICATIVA

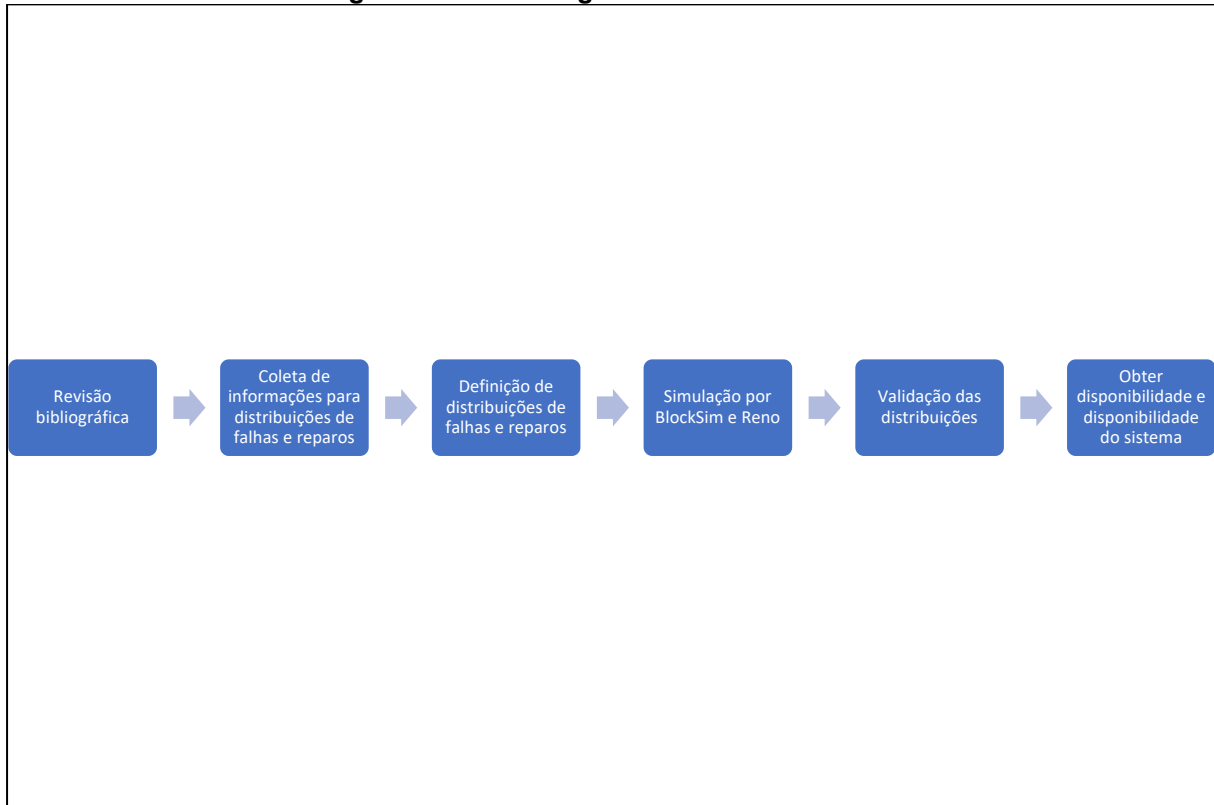
Considerando o ambiente industrial competitivo, no qual o aumento da margem de lucro se dá pela redução de custos em vez do aumento do preço para o cliente, práticas de gestão da produção e estratégias *lean* são fatores que aumentam a competitividade (HALLAM, VALERDI, CONTRERAS, 2018).

A interrupção de produção de um sistema gera custos diversos, podendo ser oriundos de paradas programadas e de paradas imprevisíveis – lucro cessante e manutenção –, dessa forma as decisões de projeto influenciam a confiabilidade final do produto e drasticamente os custos ao longo de sua vida (Koerich, 2013). Projetar um sistema baseado na aplicação de protótipos ou de decisões empíricas (baseadas na reprodução de um sistema que já apresenta histórico de produção) podem agregar custo ao preço final de comercialização que podem levar a uma consequente perda de competitividade, além do tempo despendido para o desenvolvimento de tais protótipos. Sendo assim, mesmo que o processo de simulação seja dispendioso no sentido dos custos de obtenção dos *softwares*, necessários para a realização das simulações ao longo do prazo, além do treinamento das equipes de projeto para que desenvolvam modelos cada vez mais próximos da realidade da empresa, mesmo assim a experiência de empresas que adotam esta metodologia é de redução de retrabalhos e aumento da confiabilidade final do produto, ou sistema. Por este motivo que o presente trabalho apresenta a simulação de sistemas discretos aliada à simulação de blocos de confiabilidade como ferramentas importantes para o projeto baseado na confiabilidade.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho trata-se de uma pesquisa aplicada, voltada à aquisição de conhecimentos com vistas à aplicação em uma situação específica (GIL, 2010), que no caso em estudo seria como encontrar as distribuições estatísticas que representam o processo “falha-reparo” de um sistema no contexto do projeto para a confiabilidade.

No processo de realização da pesquisa (Figura 2), as atividades estão organizadas de acordo com as seguintes etapas:

Figura 2 – Metodologia do trabalho realizado

Fonte: Autoria própria (2019)

Etapa 1: elaboração de revisão bibliográfica com base em estudos e publicações realizados na área de confiabilidade, buscando agregar conhecimento técnico-teórico para posterior aplicação da Etapa 2.

Etapa 2: retirar do referencial teórico como é feita a coleta de informações para à escolha das distribuições de falha e reparo dos ativos que fazem parte do projeto para confiabilidade que será usado como exemplo da metodologia apresentada.

Etapa 3: aplicar as teorias desenvolvidas na Etapa 2 e obter as distribuições de falha e reparo.

Etapa 4: simular, via BlockSim, um processo produtivo e aplicar as distribuições encontradas.

E por último, na Etapa 5, analisar o desempenho do sistema e sua disponibilidade.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será estruturado em seis capítulos, da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: Trata-se do capítulo introdutório deste trabalho, apresentando o tema a ser abordado, os problemas correlacionados ao tema, o objeto abordado no estudo e sua importância.

Capítulo 2 – Referencial teórico: Este capítulo tem por objetivo a contextualização dos conceitos a serem abordados e introdução da nomenclatura técnica.

Capítulo 3 – Procedimento para obtenção das distribuições de falha e de reparo dos componentes do sistema e custos: Neste capítulo apresenta-se os métodos que poderão ser realizados para obter as distribuições de falhas e reparo, além da estimativa de custo do sistema.

Capítulo 4 – Metodologia aplicada: Neste capítulo aplica-se os métodos apresentados no Capítulo 3 e obtêm-se as distribuições de falha e de reparo, além da estimativa de custo, para se realizar a simulação do sistema.

Capítulo 5 – Resultados obtidos a partir da simulação do sistema: Apresentação e análise dos resultados obtidos através da simulação do sistema modelado considerando as distribuições encontradas.

Capítulo 6 – Considerações e conclusões: Neste capítulo apresenta-se as considerações e conclusões correspondentes aos objetivos do trabalho.

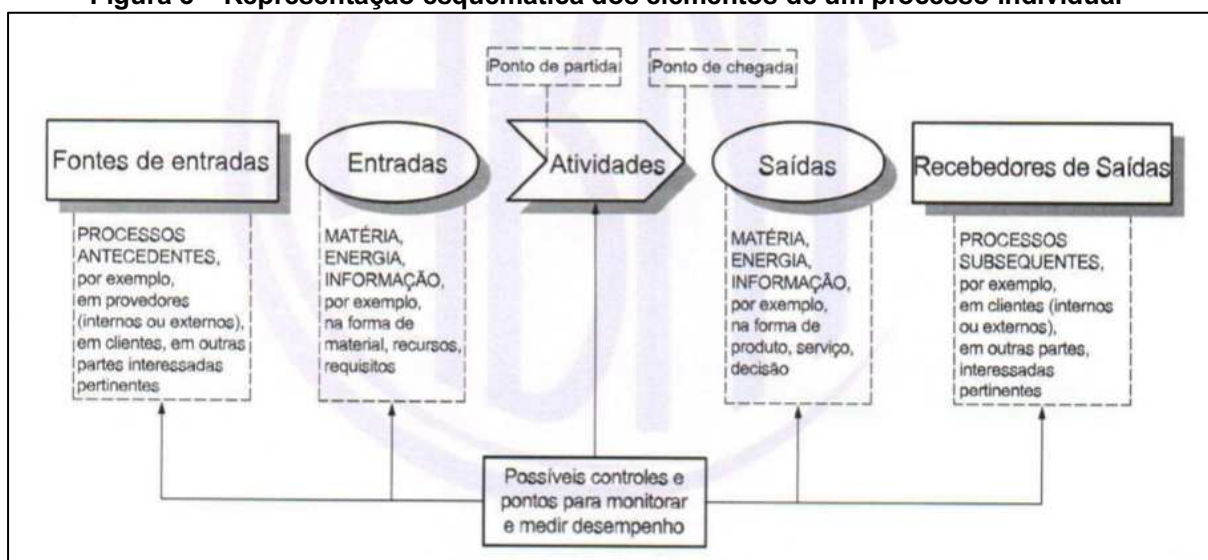
2 REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo tem o intuito de introduzir conceitos necessários para o entendimento e familiarização com termos presentes no desenvolvimento do projeto, bem como os módulos e terminologias dos *softwares* utilizados para a simulação do modelo adotado.

2.1 CONTEXTO DA QUALIDADE

A qualidade apresenta sua importância em mais variados períodos da história. Sendo possível traçar a comparação entre os processos modernos e elaborados de hoje em dia com o feito pelos artesãos de séculos passados. Por mais que boa parte dos princípios continuam os mesmos, como o atendimento dos requisitos dos clientes e a inspeção, com a passagem para uma produção em larga escala pós-revolução industrial a gama de especificações feitas pelos clientes, a preocupação com demais parte interessadas (sociedade, fornecedores etc.) e a quantidade de variantes a serem inspecionadas no controle final. Por conta dessas grandes mudanças, o foco da qualidade passou do controle e padronização do produto final para os processos, como na Figura 3. (MARTINELLI, 2009)

Figura 3 – Representação esquemática dos elementos de um processo individual



Fonte: ISO 9001 (2009)

Ainda segundo Martinelli (2009), a competitividade se baseia em alguns fatores como a qualidade, confiabilidade, entrega e preço. Sendo a qualidade o grande guarda-chuva e a confiabilidade diretamente ligada a precisão de entrega e preço competitivo, o grau de confiabilidade de um determinado processo se torna imprescindível para a manutenção de uma empresa em um patamar competitivo. Além disso, a confiabilidade se relaciona diretamente com itens da norma ISO 9001 na versão 2015, como nos itens “7.1.3 Infraestrutura” e “7.1.5 Recursos de monitoramento e medição”.

Sendo assim, é possível dizer que a confiabilidade é a qualidade no tempo, pois um dos critérios básicos para que um produto ou serviço atenda às necessidades das partes interessadas é o grau de certeza de que o sistema estará em operação em determinado momento.

2.1.1 Análise RAM – Definições e Conceitos

2.1.1.1 Confiabilidade

Conforme *Department of Defense* (1982), a confiabilidade, para sistemas não reparáveis, é a probabilidade de um item desempenhar sua função por um determinado período e condições (como temperatura, pressão e padrão de operação) pré-determinados. Já para sistemas reparáveis, é a probabilidade de um item desempenhar sua função por um determinado período, condições e manutenções pré-determinados e a certa idade do item.

2.1.1.2 Tempo até a falha - (F(t))

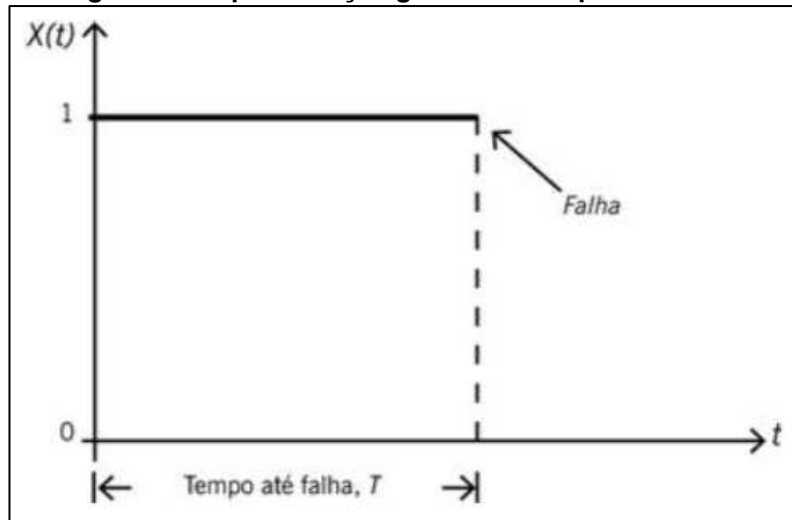
Segundo Fogliatto (2009), é o tempo transcorrido entre o momento no qual o aparelho entra em operação até sua primeira falha. Por convenção, 1 representa o aparelho em operação e 0 fora de operação como demonstrado na Figura 4. Sendo $f(t)$, a densidade de probabilidade de falha pela equação (1):

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (1)$$

A função de tempo até a falha $F(t)$ é dada por:

$$F(t) = \int_0^t f(u)du, t > 0 \quad (2)$$

Figura 4 – Representação gráfica do tempo até a falha



Fonte: FOGLIATTO (2009)

O estudo do tempo até a falha é importante, principalmente, para a definição do tempo de garantia do produto.

2.1.1.3 Função de confiabilidade - R(t)

Segundo Fogliatto (2009, pg. 16):

“A função de confiabilidade R(t) informa a probabilidade de a unidade apresentar sucesso na operação (isto é, ausência de falhas) no intervalo de tempo (0,t) e ainda estar funcionando no tempo t. A função de confiabilidade é também denominada função de sobrevivência.”

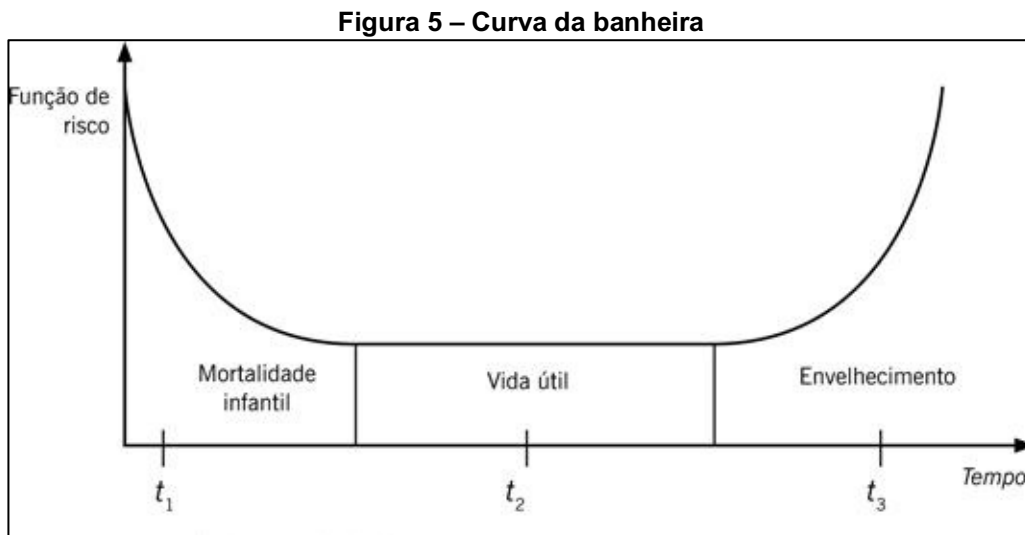
$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u)du = \int_t^{+\infty} f(u)du \quad (3)$$

2.1.1.4 Função de risco, ou taxa de falha – H(t)

Também chamada de taxa de falha ou taxa de risco. A forma da curva traçada pela função de risco indica como ocorre o envelhecimento da unidade analisada e taxa de falha instantânea é dada pela equação (4):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (4)$$

Sendo a unidade de medida falhas por tempo. Existem três estados para a função de risco:



Fonte: FOGLIATTO (2009)

(i) função de risco decrescente com o tempo; (ii) função de risco constante com o tempo; e (iii) função de risco crescente com o tempo, podendo-se representar os três estados na Figura 5, conhecida como curva da banheira. (FOGLIATTO, 2009)

2.1.1.4.1 Tempo médio até a falha – MTTF (*Mean time to fail*)

O tempo médio até a falha, tradução da sigla em inglês, é a esperança matemática de T. (FOGLIATTO, 2009)

$$MTTF = \int_0^{+\infty} tf(t)dt \quad (5)$$

2.1.1.4.2 Tempo de vida residual média – L(t)

Considerando que a unidade analisada sobreviveu até determinado tempo t , a vida residual média corresponde a vida remanescente esperada. (FOGLIATTO, 2009)

$$L(t) = \frac{1}{R(t)} \int_t^{\infty} u f(u) du - t \quad (6)$$

2.1.1.4.3 Relação proposta por Leemis (1995)

A seguinte relação proposta (Figura 6), originalmente por Leemis (1995):

Figura 6 – Representação gráfica do tempo até a falha

	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$H(t)$	$L(t)$
$f(t)$	•	$\int_t^{\infty} f(u) du$	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(u) du}$	$-\ln \left[\int_t^{\infty} f(u) du \right]$	$\frac{\int_t^{\infty} u f(u) du}{\int_t^{\infty} f(u) du} - t$
$R(t)$	$-R'(t)$	•	$-\frac{R'(t)}{R(t)}$	$-\ln R(t)$	$\frac{1}{R(t)} \int_t^{\infty} R(u) du$
$h(t)$	$h(t) e^{-\int_0^t h(u) du}$	$e^{-\int_0^t h(u) du}$	•	$\int_0^t h(u) du$	$\frac{\int_t^{\infty} e^{-\int_0^x h(y) dy} du}{e^{-\int_0^t h(u) du}}$
$H(t)$	$H'(t) \cdot e^{-H(t)}$	$e^{-H(t)}$	$H'(t)$	•	$e^{H(t)} \int_t^{\infty} e^{-H(u)} du$
$L(t)$	$\frac{1+L'(t)}{L(t)} e^{-\int_0^t \frac{1+L'(u)}{L(u)} du}$	$e^{-\int_0^t \frac{1+L'(u)}{L(u)} du}$	$\frac{1+L'(t)}{L(t)}$	$\int_0^t \frac{1+L'(u)}{L(u)} du$	•

Fonte: FOGLIATTO (2009)

A matriz representa a correção entre as medidas de confiabilidade de forma equacional (Fogliatto, 2009), sendo assim possível obter outras medidas sem a necessidade de procedimentos empíricos.

2.1.1.4.4 Tempo médio de reparo – MTTR (Mean time to repair)

É o tempo total de manutenção corretiva, item fora de operação, acumulado em determinado período de tempo dividido pelo total de manutenções corretivas concluídas neste mesmo período de tempo. (*DEPARTMENT OF DEFENSE*, 1982)

$$MTTR = \frac{\text{somatório dos tempos de reparo}}{\text{número de intervenções realizadas}} \quad (7)$$

2.1.1.4.5 Tempo médio entre falhas – MTBF (*Mean time between failures*)

É média dos tempos existentes entre o fim de uma falha e o início de outra.

$$MTBF = \frac{\text{Tempo de operação total} - \text{tempo do item parado}}{\text{número de falhas (corretivas)}} \quad (8)$$

2.1.1.4.6 Relação de manutenção – MR (*Maintenance ratio*)

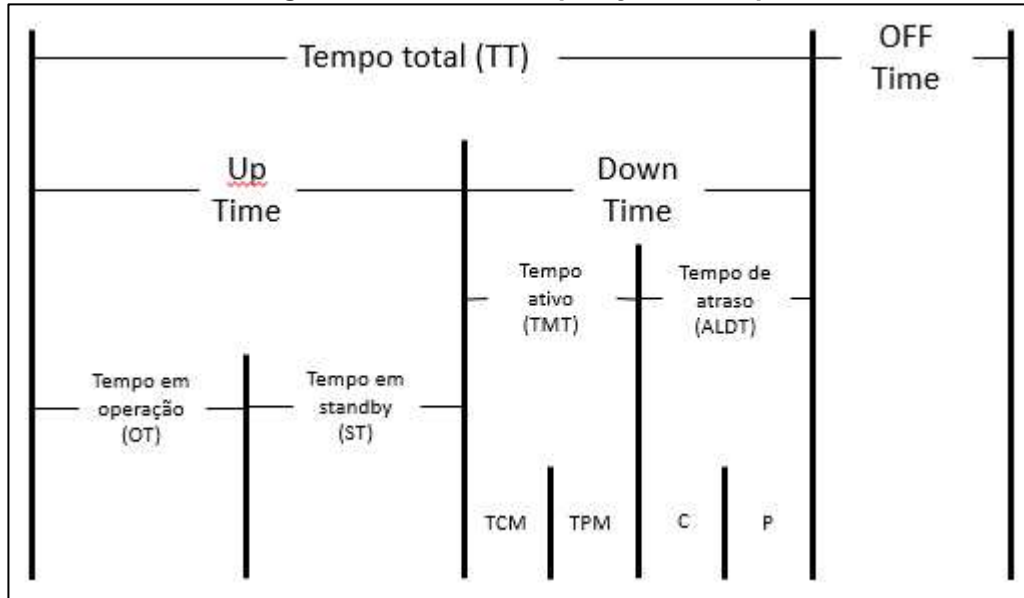
O indicador mede a quantidade de força de trabalho demandada para a manutenção do sistema.

$$MR = \frac{\text{somatório de horas homem demandadas em determinado período}}{\text{somatório das horas em funcionamento do item no mesmo período}} \quad (9)$$

2.1.1.4.7 Disponibilidade – (*Availability*)

Segundo *Department of Defense* (1982), é a medida do quanto o item analisado se encontra em condições de operação determinado. Considerando a Figura 7 como os possíveis estados do item no tempo, a disponibilidade pode ser matematicamente definida como a equação (10).

Figura 7 – Estados de operação no tempo



Fonte: Adaptado de *Department of Defense* (1982)

$$A = \frac{\text{Up Time}}{\text{Total Time}} = \frac{\text{Up Time}}{\text{Up Time} + \text{Down Time}} \quad (10)$$

Podendo-se também definir como relação entre indicadores previamente estudados. Neste caso, desconsidera-se o tempo em *standby* e *delay* associados à manutenção preventiva.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (11)$$

Ainda sobre a Figura 7, considera-se por *Up Time* o período em que a máquina está em operação, *Down Time* o período fora de operação, *standby* o período em que a máquina está pronta para uso, Tempo ativo é o tempo de atuação da manutenção, Tempo de atraso é o período entre a parada da máquina até a atuação da manutenção, TCM (*Total Time of Corrective Maintenance* – Tempo total de manutenção corretiva) com a manutenção não programada, TPM (*Total Time of Preventive Maintenance* – Tempo total de correção preventiva) como a manutenção programada, C é o tempo de atraso associado às manutenções corretivas e P é o tempo de atraso associado às manutenções preventivas.

2.1.1.4.8 Manutenibilidade

Segundo *Department of Defense* (1982), a manutenibilidade se refere a capacidade de um item ser mantido em, ou repostado a, determinada condição em um certo período, caso os recursos e procedimentos pré-estabelecidos sejam seguidos. Assim, a manutenibilidade está diretamente ligada às características de projeto do item e o tempo que será despendido na manutenção.

Por manutenção entende-se como as ações a serem tomadas para se manter um item em, ou repor o item a, determinada condição. As manutenções também podem ser subdivididas em:

- Manutenção preventiva: Inspeções, detecções e pequenas correções feitas de forma sistemática para impedir que falhas mais graves, como a falha total do item, ocorram.
- Manutenção corretiva: É a intervenção feita de maneira não programada para restabelecer o item a sua forma de operação após um mal funcionamento.

Algumas das características físicas de projeto do item que afetam a performance da manutenção são:

- Acessibilidade: O grau de facilidade de se chegar fisicamente ao item.
- Visibilidade: A propriedade do item ser reparado, ou repostado, e enxergado ao mesmo tempo.
- Testabilidade: O grau de facilidade de se identificar o item no qual ocorreu a falha.
- Complexibilidade: Se existem muitos subitens, ou subsistemas, e se suas partes são compostas por itens padronizados ou de uso específico.
- Intercambialidade: Se há a necessidade de fazer uma recalibração após a troca de um item ou não (Atualmente chamado por *plug and play*).

2.1.1.5 Análise da Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade (RAM do inglês - *Reliability, Availability and Maintainability*) por meio de simulação

Segundo CALIXTO e BRETAS (2013), o objetivo da análise RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*) é a avaliação de desempenho e definição de melhorias de aparelhos críticos do sistema para que se atinja determinado grau de disponibilidade. Porém, em muitas das vezes a análise de apenas um aparelho de um sistema complexo pode não ser o suficiente para a mensuração dos impactos das falhas e se analisa sua interação com demais elementos dos sistemas.

Para a realização dessa análise é necessário fazer o levantamento de dados de falhas dos aparelhos, a modelagem em diagrama de blocos e, por fim, a simulação do sistema baseada nos dados de falhas.

2.2 SIMULAÇÃO

Nesta seção tem-se como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica a respeito da simulação computacional de um sistema, sua definição, seus componentes analíticos, além de sua relevância. Ainda nesse capítulo, apresenta-se também as definições de sistema, modelo e simulação, assim como suas classificações. Faz-se também, a apresentação de algumas metodologias e etapas necessárias para que se tenha uma implementação bem-sucedida da simulação e finalmente descreve-se as etapas do processo de produção de alta produtividade e seleciona-se os processos no qual serão aplicadas as distribuições de falhas.

2.2.1 O QUE É SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A globalização da economia mundial é um fator que influencia fortemente na busca constante de produtividade e redução de custo, uma vez que os mercados estão cada vez mais abertos e a concorrência maior, gerando assim a necessidade de as empresas tornarem seus processos mais eficientes para garantir sua sobrevivência e crescimento no mercado (LIKER e MEIER, 2007). Essa necessidade de inovação, principalmente de processos ou de produtos, tem sido cada vez mais necessária para as empresas conseguirem estes feitos (GOMES, 2009). Por conta disso, diversas ferramentas foram criadas para que se tenha uma otimização de

processos e a diminuição de diversos desperdícios, sejam eles de superprodução, tempo de espera, transporte, processamento ou até mesmo estoque.

Uma das principais ferramentas disponíveis, capaz de simular todo o processo produtivo do começo ao fim a partir de um programa computacional, teve seu início de desenvolvimento na década de 50 com o surgimento do computador, tornando na época capaz a modelagem de filas e sua análise através da simulação, ao invés de fórmulas matemáticas, graças a imitação do funcionamento do sistema real. Após isso, na década de 60 apareceram as linguagens de simulação e na década de 80, a técnica de simulação visual, do qual teve uma surpreendente aceitação devido sua maior capacidade de comunicação. E a partir dos anos 90, teve-se o surgimento de pacotes flexíveis de programas de simulação resultando em programas como os de hoje. No Quadro 1, demonstra-se o uso da simulação computacional no decorrer das décadas, desde o seu surgimento na década de 50 até após a década de 90.

Quadro 1 – História do uso da simulação computacional

<i>Anos</i>	<i>Ferramenta</i>	<i>Características do estudo de simulação</i>	<i>Exemplos</i>
50 e 60	Linguagens de propósito geral	Aplicação em Grandes corporações; Grupos de desenvolvimento de modelos com 6 a 12 pessoas; Geram programas a serem executados em grandes computadores; Grandes investimentos em capital; Aplicáveis a qualquer contexto; Exigem conhecimento profundo da linguagem; Exigem muito tempo de desenvolvimento; Não são totalmente reutilizáveis.	FORTRAN, PASCAL e C.
70 e início dos 80	Linguagens de simulação	Utilização em um maior número de corporações; Desenvolvimento e uso dos pacotes de linguagens; Surgem linguagens de simulação baseadas em <i>System Dynamics</i> ; Comandos projetados para tratar lógica de filas e demais fenômenos comuns; Mais amigáveis, mas ainda requerem programador especializado.	SIMSCRIPT, GPSS, GASP IV, DYNAMO, SIMAN e SLAM
80 e início dos 90	Simuladores de alto nível	Introdução do PC e da animação; Presença de guias, menus e caixas de diálogos; Simulação realizada antes do início da produção; Facilidade de uso; Menos flexível que as linguagens de propósito geral e de simulação; Projetados para permitir modelagem rápida; Dispõem de elementos específicos para representar filas, transportadores etc.; Restringem-se a sistemas de certos tipos.	Simfactory e Xcell
Após 90	Pacotes flexíveis de programas de simulação	Melhor animação e facilidade de uso; Fácil integração com outras linguagens de programação; Usada na fase de projeto; Grande uso em serviços; Uso para controle de sistemas reais; Grande integração com outros pacotes (base de dados e processadores de texto); Aprimoramento dos simuladores, o que permite modelagem rápida; Integram a flexibilidade das linguagens de simulação, com a facilidade de uso dos pacotes de simulação.	Witness, Extend, Stella, ProModel for Windows

Fonte: KELTON et al. (1998).

As ferramentas de simulação continuam a evoluir, tornando-se mais adaptáveis, flexíveis e fáceis de usar, além de apresentarem melhores recursos gráficos, de comunicação e interação com o usuário, estatísticos, de animação, dentre outros (GAVIRA, p. 62, 2003).

Apesar da recorrência com o termo simulação nos dias atuais, esse termo já era citado em pesquisas na década de setenta por alguns autores. Segundo Schriber (1974), define-se simulação como uma representação de um sistema real, que apresente as mesmas respostas que o seu original teria após uma sucessão de eventos. Portanto, pode-se definir simulação como a imitação do mundo real, seja de processos ou sistemas, durante um determinado intervalo de tempo. E nesta mesma década, mas no contexto de simulação feita por programas computacionais, Shannon (1975) já descrevia simulação computacional com uma definição que se assemelha bastante às nossas definições atuais, conforme ele é um programa de computador capaz de simular o comportamento das variáveis que o sistema real apresentaria caso fosse exposto as mesmas condições.

Esta ferramenta pode ser utilizada antes de um sistema existente sofrer alterações ou de se implementar um novo sistema, podendo assim, reduzir as chances de fracasso, eliminar gargalos imprevistos, evitar o desperdício de recursos e otimizar o desempenho do sistema. Por isso, a simulação computadorizada torna-se uma vantagem, uma vez que permite o teste de alternativas antes de aplicá-las, comprovando ou não os benefícios de um futuro investimento (VIEIRA, 2006, p. 3). Entretanto, também há algumas desvantagens relacionados ao uso da simulação computacional, essas citadas por alguns autores como Law e Kelton (2000), Vieira (2006, p. 3), dentre outros.

2.2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Algumas vantagens descritas por Frigeri, Bianch e Backes (2007), Dias e Correa (1998), Banks (2000), Shannon (1998), Law & Kelton (2000), Miyagi (2006) dentre outros são:

- Processo de modelagem evolutivo: o modelo começa simples e conforme se ajusta à realidade aumenta sua complexidade, fazendo com que seja mais fácil identificar as características do problema;

- Facilidade de comunicação: em geral, um modelo de simulação é mais fácil de ser compreendido do que soluções analíticas;
- Grande flexibilidade: é possível de se aplicar aos mais variados problemas;
- Soluções rápidas: com o avanço tecnológico e evolução exponencial tanto do *hardware* quanto do *software* nos últimos anos, atualmente é possível ter uma solução de um problema complexo em poucos segundos, tempo esse essencial para se manter em alto nível de competitividade no mercado atual;
- Compressão e expansão do tempo: possibilidade de se examinar o comportamento do sistema durante um grande intervalo de tempo, sendo até em diversos anos;
- Planejamento e análise de mudanças e investimentos: é possível analisar as consequências de uma mudança em um sistema antes mesmo de serem feitas, evitando assim custos muito grandes;
- Previsão de possíveis consequências: a partir do modelo original do sistema, pode verificar-se quais seriam as consequências se as variáveis do modelo fossem alteradas ou fossem aplicadas em diferentes cenários.
- Exploração de diversas possibilidades: desenvolvido um modelo de simulação válido, é possível explorar novas políticas, procedimentos operacionais, arranjos físicos ou até novos métodos sem que se perturbe o sistema real.
- Escolha correta: a simulação permite que seja feita a melhor escolha a partir de testes de várias possibilidades, sem comprometer recursos.
- Visualização de planos: utilizando-se a animação em uma simulação possibilita visualizar a operação de uma organização enquanto a simulação ocorre, tornando o processo mais compressível e menos abstrato.

As principais desvantagens dessa técnica também relacionadas pelos mesmos autores são:

- Poder computacional: a simulação de alguns sistemas requer um grande poder de processamento para que não se gaste muito tempo;
- Construção de modelos requer conhecimento: para que possa se construir um modelo é preciso conhecimento das técnicas de modelagem e simulação

de sistemas. A técnica é aprendida e aperfeiçoada com o tempo e através da experiência;

- Análise errada dos resultados: os resultados da simulação podem ser difíceis de interpretar e compreender;
- Implementação inviável: os resultados da simulação podem ser de difícil implementação;
- Ferramentas apropriadas: a programação de um modelo de simulação pode tornar-se uma tarefa altamente desgastante se os recursos computacionais não forem os mais apropriados.

Dito as vantagens e desvantagens da utilização de simulação computacional, é importante ressaltar também que para que seja feita a simulação de uma maneira eficaz deve-se antes conhecer particularidades de um processo, além da história do sistema e, a partir desse entendimento, aplicar em sistemas computadorizados dados para compreender de fato como o sistema real funciona.

2.2.3 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Para Nance (1993, p. 2):

“A Simulação de eventos discretos utiliza um modelo lógico matemático de um sistema físico que retrata as mudanças de estado em pontos precisos em tempo simulado. Tanto a natureza da mudança de estado e do tempo em que a mudança ocorre impõe descrição precisa.”

Portanto, conforme Silva (2014, p. 10), a simulação discreta busca analisar e considerar eventos que houve alteração de estado no sistema, não importando o tempo de ocorrência entre essas alterações para que se tome uma decisão de acordo com os resultados obtidos.

2.2.3.1 Modelagem para simulação discreta

A formulação de um modelo para simulação discreta pode ser realizada de três formas:

- Pela definição das mudanças nos estados que podem ocorrer em cada tempo de evento;

- Pela descrição das atividades nas quais as entidades do sistema se envolvem;
- Pela descrição do processo através do qual as entidades do sistema fluem.

Um evento acontece em um ponto isolado do tempo, no qual decisões devem ser tomadas de forma a iniciar ou terminar uma atividade. Um processo é uma sequência ordenada de eventos e pode englobar várias atividades. Estes conceitos levam naturalmente a três alternativas de visão de um modelo para simulação discreta:

- Modelagem orientada a evento;
- Modelagem orientada ao exame da atividade;
- Modelagem orientada a processo.

Conforme Mello (2001, p. 18), esses três tipos de modelagem podem ser descritos como:

2.2.3.2 Simulação orientada a evento

Na simulação orientada a evento, um sistema é modelado pela definição das mudanças que ocorrem no tempo de evento. Deve-se desenvolver a lógica associada com cada tipo de evento, a partir da determinação dos eventos que podem causar a mudança no estado do sistema, e então executá-la em uma sequência ordenada no tempo.

2.2.3.3 Simulação orientada ao exame da atividade

Neste tipo de simulação, descreve-se as atividades nas quais as entidades do sistema estão envolvidas e indica quais as condições que causarão o início e o fim de uma atividade. Os eventos que iniciam ou terminam uma atividade só são iniciados a partir das condições especificadas para a atividade e essas condições devem ser examinadas à medida que o tempo simulado avança.

2.2.3.4 Simulação orientada a processo

Várias estruturas de modelos para simulação incluem sequências de eventos as quais ocorrem em padrões definidos e que podem ser generalizadas e definidas por uma única afirmação. Na simulação orientada a processo usa-se tais afirmações para modelar o fluxo das entidades no sistema e definir uma sequência de eventos que é automaticamente executada pela linguagem de simulação.

2.3 SISTEMAS

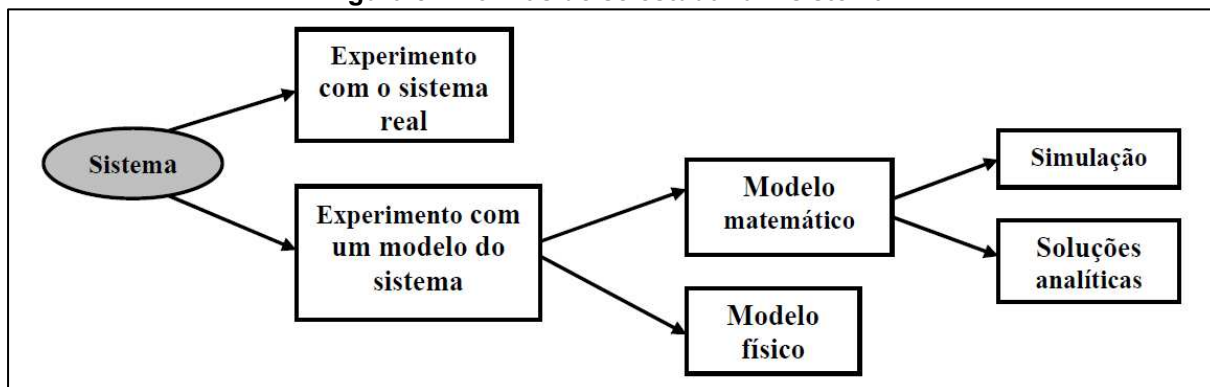
Portanto para se elaborar um projeto para confiabilidade de um sistema deve-se primeiramente entender o que vem a ser um sistema e conhecer seus conceitos. Law e Kelton (2000, p. 3) afirmam que “um sistema é definido por ser uma coleção de entidades, isto é, pessoas ou máquinas que atuam e interagem juntamente para o cumprimento de alguma lógica final”. Ou seja, é dado o nome de sistema ao grupo de objetos que interagem de forma a alcançar um propósito comum.

Para se compreender e analisar um sistema, antes deve-se definir alguns termos importantes. Conforme Gavira (2003, p.40), esses termos podem ser definidos como:

“Uma entidade é qualquer objeto ou componente do sistema que exija representação explícita no modelo. Uma atividade representa um período de tempo de duração especificada. Já um evento pode ser definido como uma ocorrência instantânea que pode alterar o estado do sistema e uma atividade representa um período de tempo de duração especificada.”

Portanto, conforme Banks (2004, p. 9), algumas vezes é interessante estudar o sistema para entender as relações entre os seus componentes ou para prever como o sistema irá operar sob uma política diferente. O estudo de um sistema nem sempre envolve o macrossistema, em alguns casos é relevante somente parte de um todo, na qual se define um subsistema. Segundo Law e Kelton (2000, p. 4) existem várias formas de abordagem no estudo de sistemas, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Formas de se estudar um sistema



Fonte: Law e Kelton (2000)

Portanto, o sistema pode ser estudado tanto com experimentos no próprio sistema real como através de um modelo que simule de forma muito parecida o sistema real. Essa segunda alternativa de estudo de sistemas é feita através da modelagem utilizando uma ferramenta que torne mais fácil a compreensão do sistema real. Uma vez construído o modelo matemático, deve-se analisar como ele pode ser utilizado para a obtenção de respostas às questões de interesse, se o modelo for suficientemente simples, pode-se trabalhar com soluções analíticas, porém se o sistema for altamente complexo deve-se optar pelo estudo através da simulação, sendo assim necessário um melhor entendimento sobre o estudo de modelos.

2.4 MODELOS

De acordo com Mellor (2005, p. 17), modelos consistem em conjuntos de elementos que descrevem alguma realidade física, abstrata ou hipotética. Portanto, um modelo é a representação da construção e funcionamento de um sistema de interesse, sendo este similar, porém mais simples que o sistema que representa. Chama-se então modelagem, o processo de produzir um modelo.

2.4.1 TIPOS DE MODELOS

De acordo com Juang (2003, p. 32), os modelos de sistema podem ser classificados em várias categorias, cujo são apresentadas a seguir:

2.4.1.1 Modelo estáticos e dinâmicos

O modelo estático é utilizado na representação formal dos fenômenos, sistemas e processos, enquanto o modelo dinâmico viabiliza o estudo longitudinal do comportamento de um sistema ou processo.

2.4.1.2 Modelo quantitativo

A modelagem quantitativa é muito utilizada nas ciências em geral para suporte a trabalhos científicos e representação dos conhecimentos adquiridos, porém tem possibilidade bastante limitada em registros e análises em problemas comportamentais de forma analítica devida à necessidade de conversão numérica.

2.4.1.3 Modelo qualitativo

Os modelos qualitativos são aqueles formulados a partir de descrições intuitivas do pesquisador ou indivíduo pesquisado e tem o objetivo de representar objetos ou indivíduos e as relações associadas, para formulação de um modelo interativo.

2.4.1.4 Modelo científicos

É uma representação lógica, um conjunto de mecanismos virtuais que permite a representação dos conhecimentos científicos obtidos por meio da experimentação ou observação dos fenômenos da natureza, bem como produtos e processos. Há diferentes tipos de modelos científicos, sendo eles:

2.4.1.4.1 Modelo diagramático ou esquemático

É um conjunto de linhas e símbolos que representam a estrutura ou o comportamento de um sistema ou objeto real, caracteriza-se pela representação com pouca semelhança física entre o modelo e o seu equivalente real.

2.4.1.4.2 Modelo gráfico

É uma representação visual de dados ou informações numéricas do sistema, referentes a tudo aquilo que pode ser medido ou quantificado, com o objetivo de facilitar sua compreensão.

2.4.1.4.3 Modelo matemático

Um modelo matemático é um tipo de modelo científico que emprega equações matemáticas para representar sistemas complexos e de difícil observação em situações reais. De acordo com Law e Kelton (p.5, 2000) pode ser classificado de acordo com os métodos utilizados na obtenção dos resultados numéricos:

- Modelos analíticos: sua estrutura é formada por uma série de equações matemáticas, por meio das quais o comportamento do sistema pode ser obtido pela atribuição de valores aos parâmetros do modelo e a solução das equações.
- Modelos de simulação: são representados por uma estrutura matemática ou lógica, cujo a função é a de imitar exatamente o comportamento do sistema.

Modelos matemáticos podem também ser classificados conforme as características do sistema. Sendo essas as seguintes classificações:

- Modelos lineares ou não lineares: diz-se que modelos são lineares quando suas variáveis são independentes linearmente, ou seja, a resposta de uma variável endógena a uma variável independente ou exógena, sempre será a mesma (GEORGES, p. 77, 2005). Já os modelos não-lineares são aqueles em que o relacionamento das variáveis endógenas e exógenas não se dá através de relações lineares (GEORGES, p. 78, 2005).
- Modelos estáticos ou dinâmicos: em um modelo de simulação estático não se considera a variável tempo já que este não desempenha nenhum papel importante, portanto nele se representa um sistema em um determinado ponto

específico (MELLO, p. 13, 2001). Já um modelo de simulação dinâmico representa um sistema que se altera ao longo do tempo (LAW & KELTON, p. 6, 2000).

- Modelos estocásticos ou determinísticos: nos modelos estocásticos as variáveis de entrada do sistema assumem diversos valores dada uma probabilidade, com isso seus resultados são gerados randomicamente a cada replicação devido à essa natureza aleatória das variáveis de entrada no modelo (MELLO, p. 13, 2001). Já no modelo determinísticos, as variáveis de entrada assumem valores exatos, ou seja, não possui nenhuma variável em função de uma probabilidade e, portanto, seus resultados sempre serão iguais em todas as suas replicações (LAW & KELTON, p. 6, 2000).

- Modelos discretos ou contínuos: diz-se que um modelo é discreto quando o estado de suas variáveis se altera aleatoriamente e instantaneamente ao longo do tempo, no entanto em modelos contínuos, as mudanças do estado de suas variáveis sempre se altera de forma contínua em função do tempo (LAW & KELTON, p. 7, 2000).

2.4.2 ETAPAS DE MODELAGEM DE UM SISTEMA

De acordo com Freitas Filho (2001, p. 25), quatro etapas são importantes para que um sistema possa ser bem modelado. São elas: etapa de planejamento, etapa de modelagem, etapa de experimentação e última etapa de tomada de decisão e conclusão do projeto.

2.4.2.1 Planejamento

Segundo o autor na etapa de planejamento deve-se realizar:

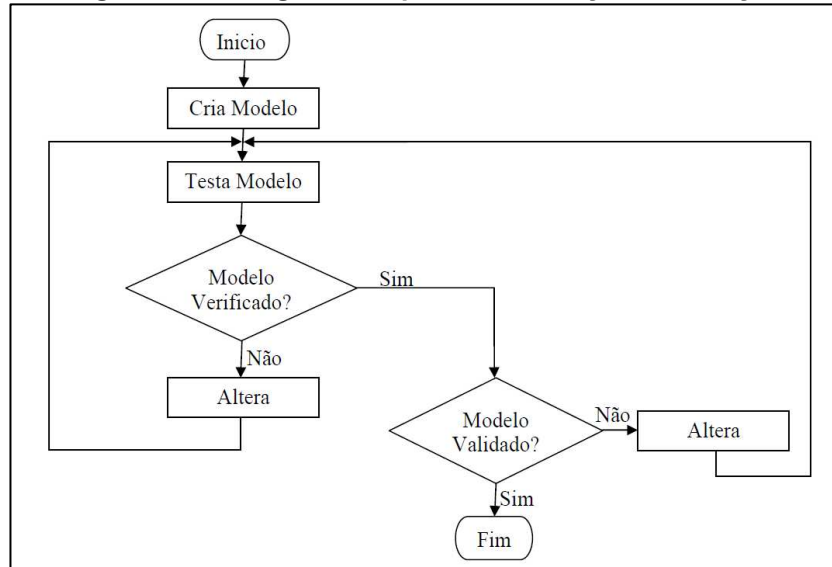
- **Formulação e Análise do Problema:** deve-se primeiramente entender o problema e definir qual o propósito que se deseja alcançar, a motivação, além de analisar os possíveis riscos bem como restrições e limites do problema;

- Planejamento do Projeto: procura-se viabilizar recursos pertinentes ao projeto, elaborar um cronograma de atividades e descrever os vários cenários que serão investigados;
- Formulação do Modelo Conceitual: abstrai-se do sistema real em uma determinada forma de modelagem. Devem ser estabelecidos como os dados deverão ser incluídos no modelo, a estratégia de modelagem e o nível de abstração;
- Coleta de Macro informações: coleta-se qualquer informação, estatística ou fato que seja fundamental na contribuição para o estudo.

2.4.2.2 Modelagem

Após realizada a etapa de planejamento, segundo Freitas Filho (2001), deve-se seguir para a etapa de modelagem com os seguintes passos:

- Coleta de Dados: seleciona-se os dados de forma específica e utiliza-os no modelo. Deve-se ter o cuidado para não introduzir no modelo dados errados para que não haja uma inconsistência na inferência dos resultados;
- Tradução do Modelo: faz-se o mapeamento do modelo conceitual para uma linguagem de programação ou de simulação específica;
- Verificação e Validação: após traduzir o modelo em uma linguagem específica, deve-se verificar possíveis erros de sintaxe e ser validado através de análise e comparação dos resultados gerados com o sistema real. A Figura 9 mostra as etapas de verificação e validação de um modelo.

Figura 9 – Fluxograma etapas de verificação e validação

Fonte: Aragão (2000)

Após realizada as etapas de coleta de dados, tradução e verificação/validação, pode-se seguir para a etapa de experimentação do modelo criado, assunto da seção 2.4.2.3.

2.4.2.3 Experimentação

- Projeto Experimental Final: elabora-se um conjunto de experimentações para que se tenha resultados melhores;
- Experimentação: é feita execução do modelo para a obtenção dos resultados;
- Interpretação e Análise Estatística dos Resultados: a partir de inferências sobre os resultados alcançados da execução do modelo, será possível analisar os dados e estimar o desempenho do sistema, e se necessário faz-se replicações para se obter maior precisão estatísticas dos resultados que se espera.

2.4.2.4 Decisão e conclusão

Conforme Freitas Filho (2001), a etapa de decisão e conclusão constitui em:

- Comparação de Sistemas e Identificação das melhores soluções: analisa-se qual o modelo que se adéqua ao problema com maior eficiência ou

compara-se com outro sistema já existente, caso houver apenas um modelo desenvolvido;

- Documentação: consiste em detalhar formalmente todos os passos percorridos durante o desenvolvimento do projeto;
- Apresentação dos Resultados e Implementação: finalmente, apresenta-se uma breve descrição das atividades executadas durante o projeto, os resultados alcançados e sua precisão, a confirmação dos objetivos estabelecidos e medidas que poderiam vir a melhorar o sistema no futuro, se houver.

2.5 SOFTWARES

Com o grande avanço na indústria de *softwares*, diversos *softwares* surgiram nas últimas décadas com o objetivo de apresentar soluções e alternativas às simulações computacionais, tornando-as mais acessíveis, dinâmicas e de fácil visualização. Conforme Vieira (2006, p. 4), alguns dos programas disponíveis nessa área de simulação de sistemas de produção atualmente são: “ARENA (*Rockwell Software Automation Inc.*), AutoMod (*Autosimulations*), Extend (*Imagine That*), GPSS H (*Wolverine*), Micro Saint (*Micro Analysis & Design*), ProModel (*ProModel Corporation*), dentre outros

Para o levantamento dos softwares comerciais para cálculo de confiabilidade existentes no mercado internacional e difundidos entre as empresas, foram levantadas informações em literatura especializada.

Willis (2000), apresenta uma seleção de alguns softwares existentes no mercado para o cálculo da confiabilidade de sistemas simples e complexos: AVSIM; BLOCKSIM; CARE; MEADep; RAPTOR; RELEX; PAR e TIGER.

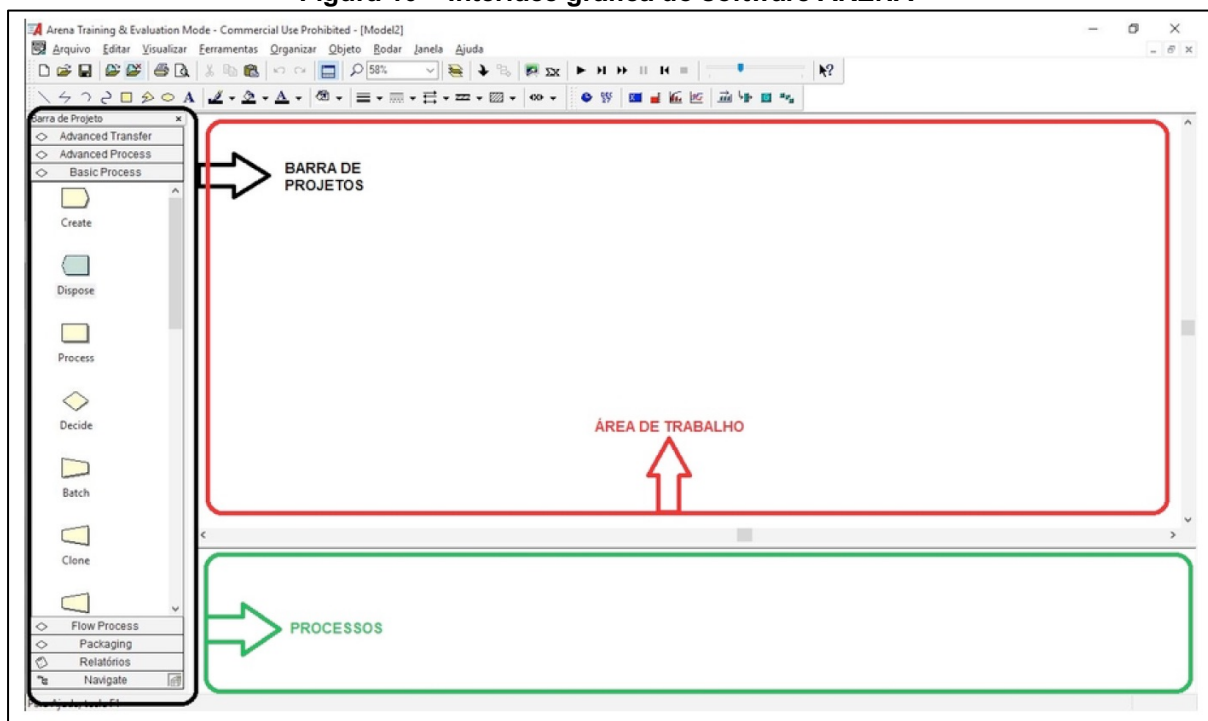
Devido a facilidade de acesso ao *software* em âmbito universitário, treinamentos específicos para utilização dos programas e suporte técnico no Brasil, o software selecionado para a apresentação no presente trabalho, foi o *ReliaSoft Synthesis Plataforma*, da empresa ReliaSoft, o qual possui o BlockSi.

2.5.1 O SOFTWARE ARENA

Neste trabalho utiliza-se o *software* ARENA 15.1 com licença estudantil para simular o processo produtivo e aplicar a distribuição de falha e reparo encontradas.

O ARENA foi lançado em 1993 pela empresa americana *Systems Modeling* e é um ambiente gráfico integrado de simulação muito utilizado em simulação de processos produtivos, análise estatística e análise de resultados. Conforme Prado (2004, p. 28) no Arena, assim como a maioria dos *softwares* de simulação, visualiza o sistema a ser modelado como constituído de um conjunto de estações de trabalho que prestam serviços a clientes que se movem através do sistema. Nele “o movimento pode ser feito pela própria entidade ou por transportadores (empilhadeiras, por exemplo) ou correias” (PRADO, 2004, p. 28). A Figura 10, mostra como é a interface gráfica do *software* ARENA.

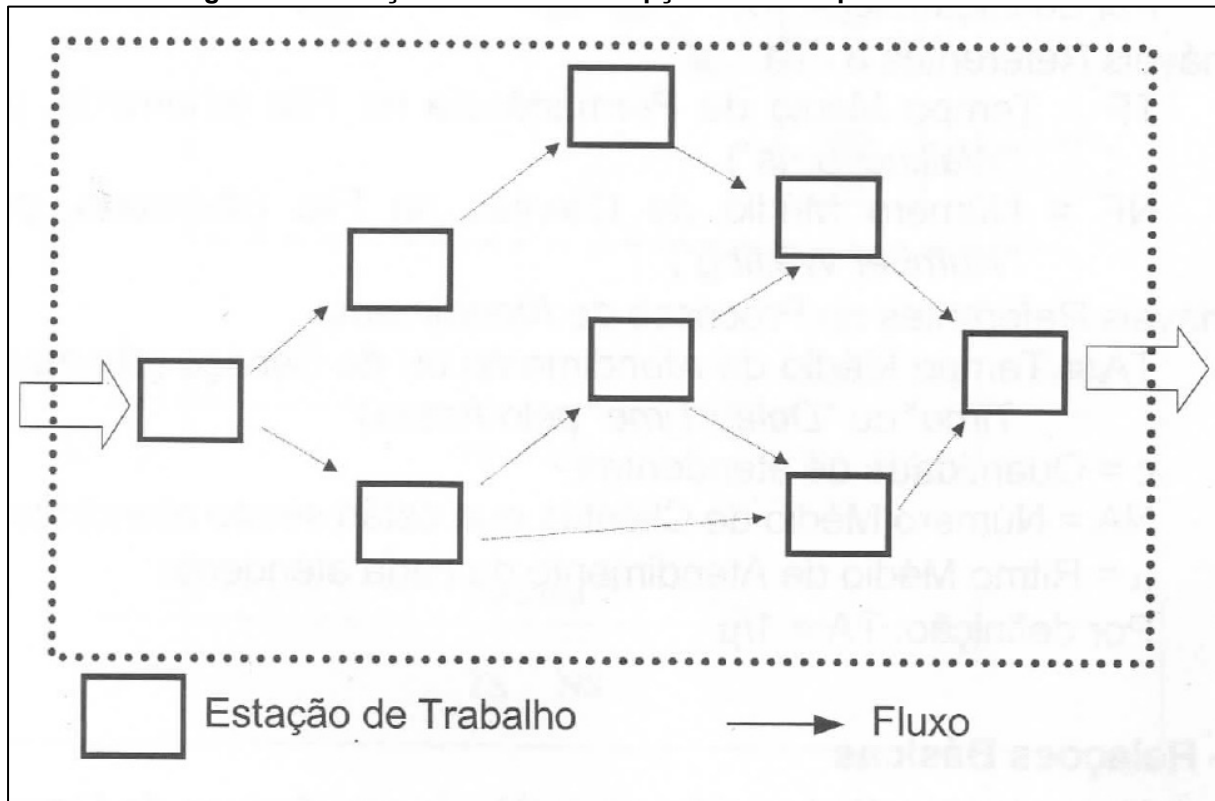
Figura 10 – Interface gráfica do software ARENA



Fonte: Trevisan & Sampaio (2017)

Cada simulação é constituída de um modelo lógico-matemático em formato de fluxograma que representa a dinâmica do sistema em estudo. Ao modelo são anexados dados sobre o sistema a partir de distribuições estatísticas geradas por uma coleção de dados sobre o parâmetro a ser inserido, diferenciando-se assim dos métodos matemáticos, do qual utilizam valores médios para os parâmetros do modelo resultando em uma representação do sistema no computador (ARAGÃO, 2011, p. 31). Assim, para montar um modelo com o Arena deve-se primeiramente construir um desenho mostrando o sistema que está sendo simulado (Figura 11).

Figura 11 – Estações de trabalho e opções de fluxo para a entidade



Fonte: Prado (2010)

Conforme observado na figura 11, esse desenho deve ser constituído de estações de trabalho, onde a entidade receberá algum serviço, e opções de fluxo, para entidade, entre as estações de trabalho (PRADO, 2010, p. 29).

2.5.1.1 Principais módulos do ARENA

No Arena existe um conjunto de padrões que são utilizados na formação do modelo que se deseja, conhecidos como *templates*, que nada mais são do que elementos que ilustram por meio de um fluxograma a atual situação da área semelhante do sistema.

Segundo Prado (2014, p. 28) “o Arena possui um conjunto de blocos (ou módulos) que são utilizados para se descrever uma aplicação real”. Existem dois tipos de módulos no Arena, sendo eles: Módulos de fluxograma e Módulos de dados.

Nos módulos de dados, ganha-se informações relacionadas ao modelo, mas não são colocados no meio da área de trabalho (PRADO, 2014, p. 51). Neste módulo

tem-se seguintes ferramentas: *Entity*, *Queue*, *Resource*, *Variable*, *Schedule* e *Set*. cujo suas funções são descritas por Pereira (2009, p. 31) e estão suas descrições estão presentes no Anexo A.

Portanto, conforme Freitas Filho (2008), é possível concluir que cada ferramenta presente no *software* ARENA tem a sua aplicação e importância nas criações dos relatórios e resposta com suas comparações.

2.5.2 O SOFTWARE RELIASOFT SYNTHESIS PLATAFORM

Utiliza-se neste trabalho o *software Reliasoft Synthesis Platform* com o objetivo de encontrar e definir as distribuições de falha e reparo do sistema em análise, para assim determinar sua confiabilidade.

Desenvolvida pela Reliasoft, a Plataforma Synthesis integra todas as ferramentas de confiabilidade da empresa, expandindo e potencializando suas funcionalidades e transformando-as em uma solução corporativa e de fácil de implantação.

Com a integração da Plataforma *Synthesis*, as análises realizadas são armazenadas em um banco de dados centralizado que suporta o acesso simultâneo de vários usuários e também compartilha informações relevantes de confiabilidade entre as ferramentas da Synthesis (RELIASOFT, 2018).

Dentre as várias ferramentas desta plataforma, as principais ferramentas são:

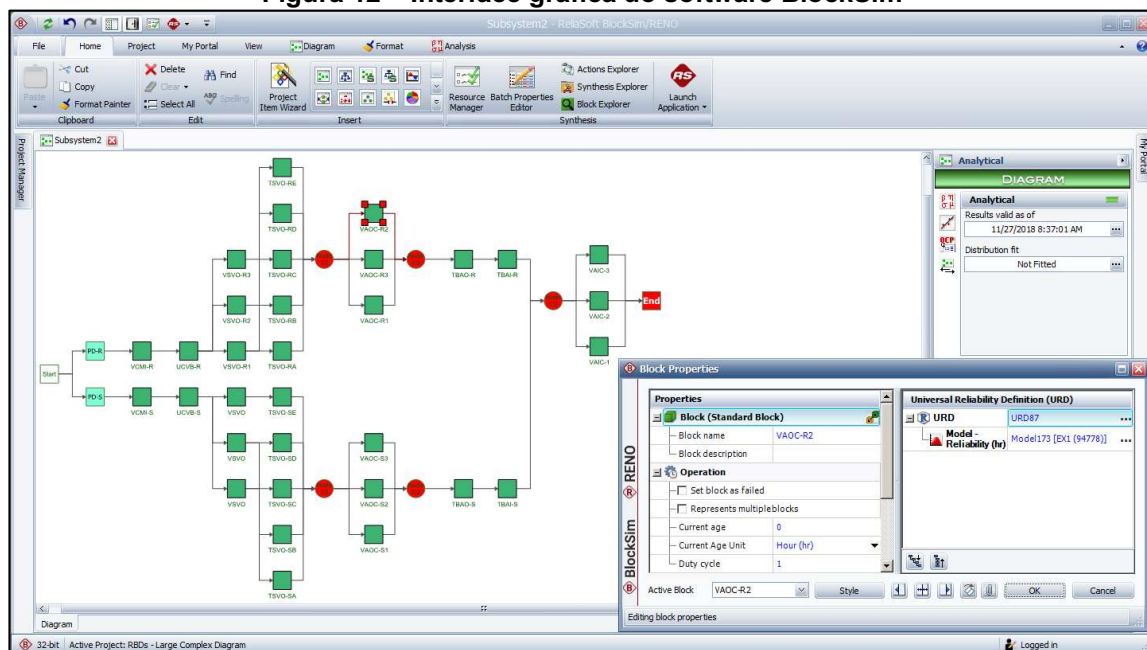
- Weibull++: análise de dados de vida (confiabilidade);
- ALTA: ensaios acelerados de vida;
- BlockSim: confiabilidade de sistema;
- RENO: análise de risco e simulação estatística;
- RGA: crescimento da confiabilidade e sistemas reparáveis;
- Lambda Predict: normas de predição da confiabilidade;
- Xfmea: análise dos modos e efeitos de falha (FMEA/FMECA);
- RCM++: manutenção centrada na confiabilidade;
- RBI: inspeção baseada em risco.

2.5.3 BLOCKSIM

O *software* BlockSim fornece uma plataforma para a análise da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade de sistemas, utilizando a abordagem de diagrama de blocos de confiabilidade (RBD) e análise de árvore de falha (FTA).

Utilizando cálculos analíticos e simulação de eventos discretos, o BlockSim oferece uma grande variedade de análises para sistemas reparáveis e não reparáveis. Isso inclui análise de confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade, otimização da confiabilidade, produção (*throughput*), alocação de recursos, custo do ciclo de vida (*LCC - Life Cycle Cost*) e outras análises (RELIASOFT, 2018).

Figura 12 – Interface gráfica do software BlockSim



Fonte: Reliasoft (2019)

Os resultados da simulação podem ser utilizados em aplicações, incluindo:

- Escolher a estratégia de manutenção mais eficaz, considerando segurança, custo e disponibilidade.
- Determinar o intervalo ideal para manutenção preventiva (PM).
- Gerenciamento do estoque de sobressalentes, considerando fatores como custo, taxa de utilização, restrições de suprimento, etc.
- Identificar os componentes que têm o maior impacto sobre a disponibilidade (tempo de inatividade).

3 PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE FALHA E DE REPARO DOS COMPONENTES DO SISTEMA E CUSTOS

3.1 DISTRIBUIÇÕES DE FALHAS

As distribuições de falhas de componentes ou subsistemas poderiam ser obtidas da seguinte maneira:

- a) A partir de dados históricos coletados de sistemas já em operação;
- b) Obtendo informações de confiabilidade diretamente dos fornecedores de componentes ou subsistemas;
- c) Por meio de ensaios acelerados de vida

Adotou-se neste trabalho, considerando que não se tinha as informações provindas das alíneas “a”, “b” e “c” anteriores, uma estimativa de falhas dos componentes ou subsistemas, baseada nas premissas de que sistemas ou subsistemas eminentemente mecânicos apresentam padrão de falha por desgaste (MOUBRAY, 1996), logo procurou-se uma distribuição de probabilidade teórica que melhor caracteriza este comportamento. Para subsistemas mais complexos que envolvem muitos tipos de sistemas simultaneamente (mecânicos, eletrônicos, pneumáticos dentre outros), eletrônicos ou micro processados estes por sua vez seguem uma tendência de falha constante ao longo do seu ciclo de vida útil, para este tipo de componente, subsistema ou sistema utiliza-se distribuições de probabilidades teóricas que apresentam taxa de falha constante para o período de vida útil.

A partir destas premissas sobre as tendências de falhas e, sabendo-se com que tipo de distribuições teóricas de probabilidade ir-se-ia trabalhar, estabeleceu-se um processo de estimação dos parâmetros dessas distribuições.

3.1.1 Passos para obtenção das distribuições de falhas dos componentes ou subsistemas;

Para obter as distribuições de falha, seguiu-se os seguintes passos:

Passo 1 – Definir os elementos da linha de acordo com o modelo de simulação exemplo do ambiente ARENA. A partir da definição dos elementos da linha

pesquisou-se na internet produtos similares a venda para obtenção do preço e tempo de garantia.

Passo 2 – Estratégia para conseguir distribuições de falha dos elementos do sistema:

- Para equipamentos mecânicos, que historicamente apresentam padrão ou tendência de falha por desgaste, utilizou-se uma distribuição Weibull de dois parâmetros (2P)
- E, para equipamentos eletrônicos, que apresentam historicamente padrão ou tendência de falha ou constante ao longo de seu tempo de vida, utilizou-se distribuições exponenciais de um parâmetro (1P);
- Adotou-se uma confiabilidade estimada de 60% para os tempos de garantia de cada elemento da linha de acordo com os dados obtidos nos sítios de internet e, a partir dessa definição, os parâmetros beta (β) e eta (η), para distribuições Weibull 2P, e λ , para distribuições exponencial 1P, foram ajustados aleatoriamente para o atingimento da confiabilidade projetada nos determinados tempos de garantia.

3.2 DISTRIBUIÇÕES DE REPARO E INTERVALO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

As distribuições de reparação teoricamente poderiam ser obtidas considerando-se:

- a) Os tempos de reparo coletados dos sistemas já em operação;
- b) Tempos de reparo fornecidos pelos fabricantes dos componentes ou subsistema utilizados na montagem da linha

Para a obtenção destas distribuições partiu-se de que não haveria a possibilidade de realização da coleta de dados como descritos nas alíneas “a” e “b” anteriores. Considerou-se também que as tarefas de suporte, para que o reparo seja efetuado no período de *downtime* ou de parada por falha do componente ou subsistema, já foram consideradas no referido tempo de reparação.

Os tempos de reparação foram encontrados na literatura disponível na internet, como por exemplo a determinação do tempo médio de reparo da máquina envasadora. (KAMIL, 2018)

Para definir as distribuições de manutenção, deve-se:

Passo 1 – Procurar pelo MTTR dos elementos do sistema:

- Dados obtidos de fornecedores, clientes ou de manuais na internet;
- Considerar tanto para manutenção preventiva quanto corretiva o mesmo tempo de reparo.

Passo 2 – Definir quando as manutenções ocorrem:

- As manutenções corretivas ocorrem mediante falha do elemento;
- Manutenções preventivas ocorrem em intervalos constantes de tempo, determinados pelo tempo simulado dividido pelo número de falhas ocorridas nesse período.

3.2.1 Tempo entre manutenções preventivas

Passo 1 – Com as distribuições de falha e de reparo encontradas simulou-se, por meio do BlockSim, o sistema para 10 anos (87.600 h);

Passo 2 – Determinação do MTBF:

- Contar o número de vezes que o elemento falhou nos 10 anos simulados;
- Dividir 87.600 h (10 anos) pelo número de falhas ocorridas nesse tempo, para obter o tempo médio entre manutenções corretivas (próximo ao MTBF, considerando o baixo tempo de reparo em relação ao tempo total estudado);

- Utilizar a relação de 6 manutenções preventivas para 1 manutenção corretiva ao dividir o MTBF por 6 para obter o tempo constante entre manutenções preventivas (PASCHICH, 2016).

3.3 CUSTO DE MANUTENÇÃO

Os custos de manutenção poderiam ser obtidos da seguinte maneira:

- a) A partir de dados obtidos através de fornecedores de componentes ou subsistemas;
- b) Colhendo informações de proprietários de sistemas similares;
- c) Por meio de pesquisas na literatura ou internet para se obter informações sobre os valores de custos em sistemas similares.

Adotou-se neste trabalho, considerando que não se tinha as informações provindas das alíneas “a”, “b” e “c” anteriores, uma estimativa dos custos de manutenção baseada nas premissas de que, segundo Weber (2005), em uma empresa de nível global gasta-se cerca de 3% do valor do componente em manutenção anual para realizar seu reparo.

A partir destas premissas sobre os custos de manutenção e, obtendo-se os preços de cada componente no site www.alibaba.com, estabeleceu-se um processo para estimar o custo de manutenção de cada um dos elementos envolvidos no sistema.

Para definir os custos de manutenção:

Passo 1 – Considerando uma perda de 20 centavos de dólar por garrafa e uma produção de 2350 garrafas por hora, calcula-se um total de U\$ 470,00 o custo por hora parada;

Passo 2 – Definir quantas falhas ocorrem por ano ao dividir a quantidade de falhas por 10 (devido a simulação ser para um tempo de 10 anos);

Passo 3 – Dividiu-se 3% do valor do elemento da linha pela quantidade de falhas do elemento por ano.

4 METODOLOGIA APLICADA

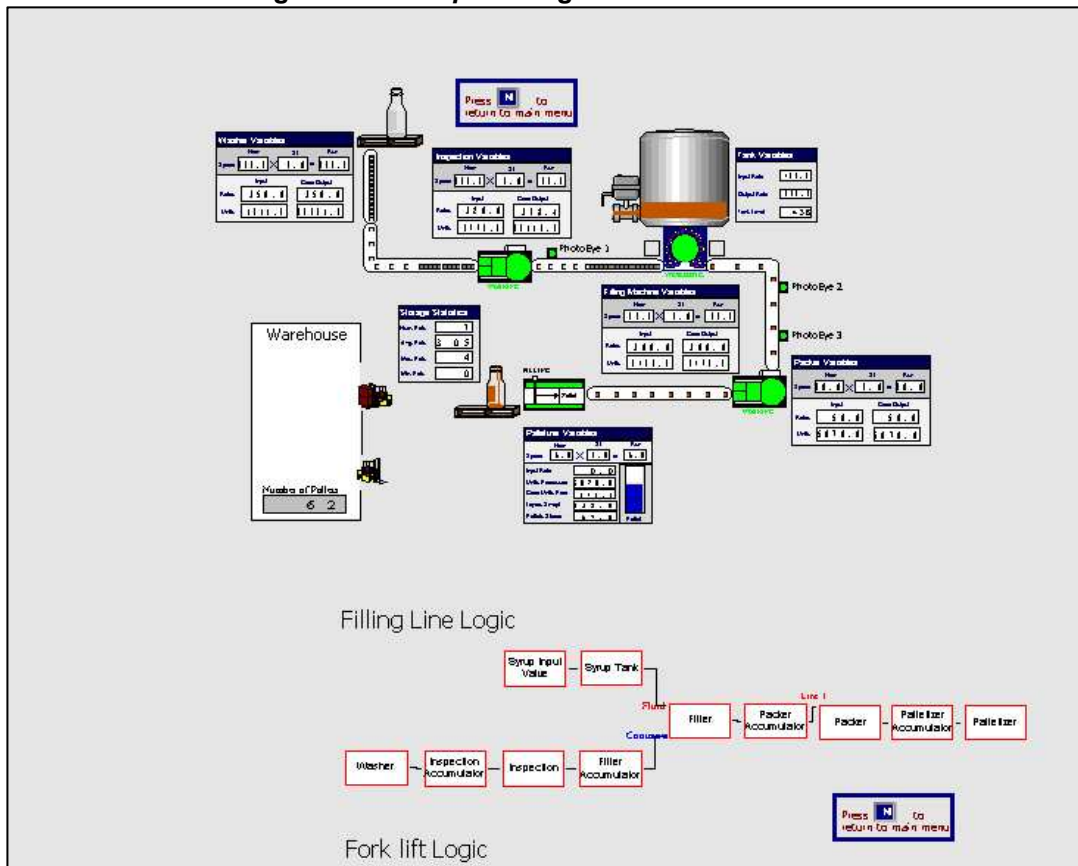
Este capítulo tem como objetivo descrever o objeto de estudo deste trabalho, além de todos os procedimentos realizados para obtenção das distribuições de cada elemento do sistema, assim como os parâmetros apropriados para se obter por meio da simulação a estimativa da disponibilidade do sistema, principal objetivo desse trabalho.

4.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo em questão é uma engarrafadora de médio porte, com um sistema de produção totalmente automático, portanto sem nenhum processo manual, e uma produção média de 2350 garrafas por hora.

Como apresentado na Seção 2.5.1, o *software* ARENA possui diversos *templates* pré-definidos dos quais simulam os processos de uma série de sistemas de produção. No presente trabalho utilizou-se um desses *templates* pré-definidos do Arena para se definir todos os elementos presentes na engarrafadora em estudo, bem como todos os processos de seu sistema. A Figura 13 ilustra o *template* utilizado do ARENA:

Figura 13 – Template Engarrafadora do ARENA

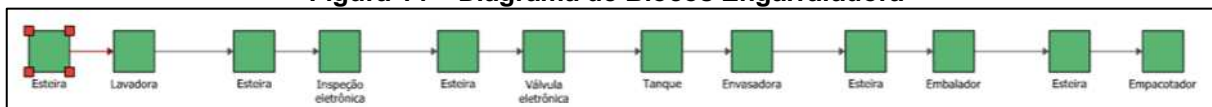


Fonte: Autoria própria (2019)

Como observado na Figura 13, o sistema em questão é constituído de cinco esteiras para transportar as garrafas entre um processo e outro, uma lavadora, um tanque para o armazenamento da cerveja, uma válvula eletrônica, uma inspeção eletrônica, uma envasadora, um embalador e um empacotador.

Escolhido um *template* similar ao sistema de estudo e definido os seus elementos e processos, deve-se agora representá-lo como diagrama de blocos para que assim possa ser inserido no software *Realiasoft Synthesis Plataforma*. A Figura 14 mostra o diagrama de blocos para tal engarrafadora:

Figura 14 – Diagrama de Blocos Engarrafadora



Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se pelo diagrama que o sistema de produção além de ser um sistema simples, possui processos totalmente em série, aumentando a importância de cada elemento na disponibilidade do sistema como um todo.

4.2 METODOLOGIA

Como apresentado no Capítulo 3 uma vez definido os elementos que constituem o sistema, deve-se agora definir uma estratégia para se obter as distribuições de falha e reparo.

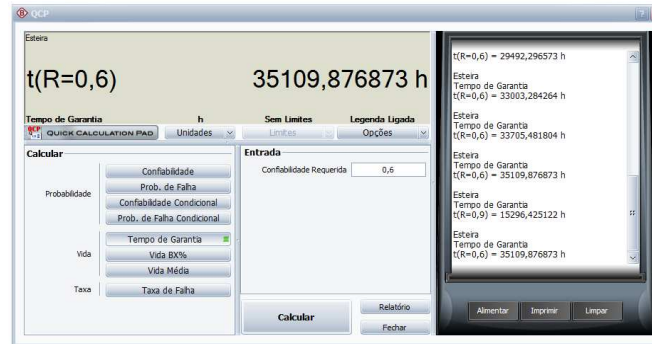
4.2.1 DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE FALHA

Utilizando o sistema definido na seção 4.1 (Figura 14) e conhecendo os tempos de garantia de cada elemento, adota-se uma confiabilidade requerida de 60% e distribuições Weibull 2 parâmetros para equipamentos mecânicos (falhas por desgaste) e exponencial 1 parâmetro para equipamentos eletrônicos (falha constante) tornando assim, possível ter uma estimativa dos parâmetros das distribuições de falha de cada bloco. As seções a seguir demonstram como foi feita a determinação de cada elemento do sistema.

4.2.1.1 Esteira

Para todas as esteiras do sistema foi adotado um tempo de garantia de 4 anos (35.040h), tempo esse encontrado através de pesquisas em *sites* onde há a venda de esteiras para uso em sistemas similares. Uma vez definido o tempo de garantia, define-se os parâmetros *beta* (β) e *eta* (η) que satisfazem uma confiabilidade de 60%. A Figura 15 demonstra o cálculo realizado no *software* BlockSim com os valores de *beta* (β) e *eta* (η) *definidos*, dos quais resultam em um tempo de garantia próximo ao adotado com uma confiabilidade de 60%.

Figura 15 – Tempo de Garantia Calculado Bloco Esteira com $\beta = 1,9$ e $\eta = 12500$



Fonte: Autoria própria (2019)

Como observado na Figura 15, com o valor de *beta* igual a 1,9 e *eta* igual a 12.500, obtêm-se um tempo de garantia de aproximadamente 35.100 horas, valor próximo ao tempo de garantia desejado de 4 anos (35.040h).

4.2.1.2 Lavadora

Baseado em pesquisas na internet de lavadoras similares à venda, o tempo de garantia para a lavadora foi definido em 2 anos (17.520h) e os parâmetros *beta* (β) e *eta* (η) que satisfazem a confiabilidade requerida nesse tempo de garantia foi de 2,2 e 11.900 respectivamente, como demonstrado na Figura 16:

Figura 16 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Lavadora com $\beta = 2,2$ e $\eta = 11900$



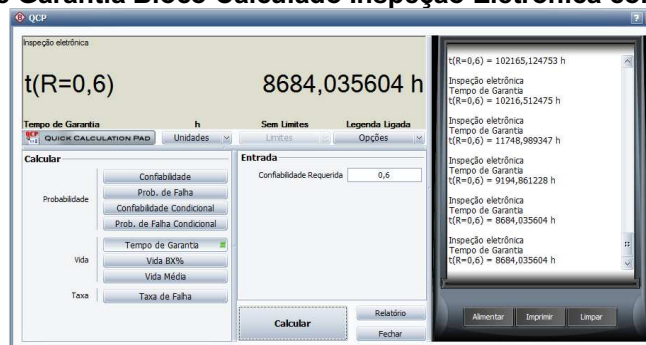
Fonte: Autoria própria (2019)

De acordo com a Figura 16, utilizando um *beta* igual a 2,2 e *eta* igual a 11.900 para a lavadora, obtêm-se um tempo de garantia próximo ao tempo de garantia definido de 2 anos (17.040h).

4.2.1.3 Inspeção Eletrônica

O tempo de garantia encontrado para inspeção eletrônica foi de 1 ano (8.760h) e como se trata de elemento eletrônico, deve-se escolher uma distribuição de falha exponencial devido as falhas serem constantes em elementos dessa natureza.

Figura 17 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Inspeção Eletrônica com Exponencial = 17200



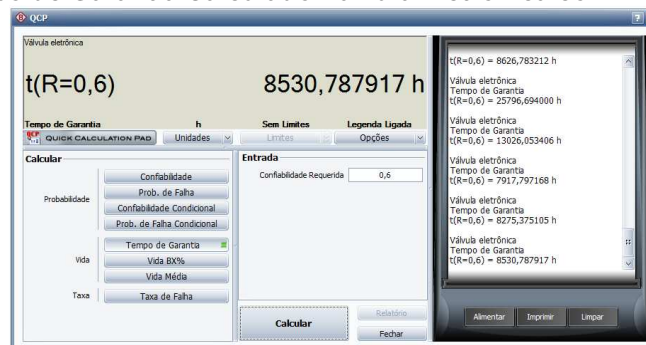
Fonte: Autoria própria (2019)

Como observa-se na Figura 17, o valor do parâmetro encontrado para a distribuição exponencial, que resulta em um tempo de garantia calculado próximo ao definido, foi de 17.200.

4.2.1.4 Válvula Eletrônica

Seguindo o mesmo raciocínio da inspeção eletrônica, pois também se trata de um elemento eletrônico, define-se a distribuição de falha da válvula eletrônica como também sendo uma exponencial de um parâmetro para um tempo de garantia de 1 ano (8.760h), tempo encontrado em sites de venda de válvulas eletrônicas para uso em sistema similares.

Figura 18 – Tempo de Garantia Calculado Válvula Eletrônica com Exponencial = 17200



Fonte: Autoria própria (2019)

A Figura 18 demonstra que o valor para esse parâmetro da distribuição exponencial, que condiz com o tempo de garantia encontrado, é de 17.200.

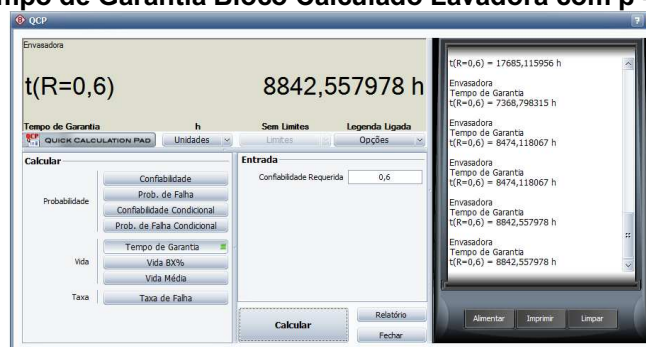
4.2.1.5 Tanque

Por ser um elemento estático, portanto sem desgaste, pressupõe-se que raramente ocorre falhas. Para a distribuição de falhas do tanque considerou-se falha igual a 0 (zero) para esse estudo em questão.

4.2.1.6 Envasadora

Levando em consideração pesquisas realizadas em sites de venda de envasadoras, foi definido um tempo de garantia de 1 ano (8.760h). Define-se o valor de β (beta) igual a 2,2 e de η (eta) igual 23.800, para que resulte em uma confiabilidade igual a 60% nesse tempo de garantia encontrado, como se pode observar nos cálculos realizados abaixo (Figura 19).

Figura 19 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Lavadora com $\beta = 2,2$ e $\eta = 23800$



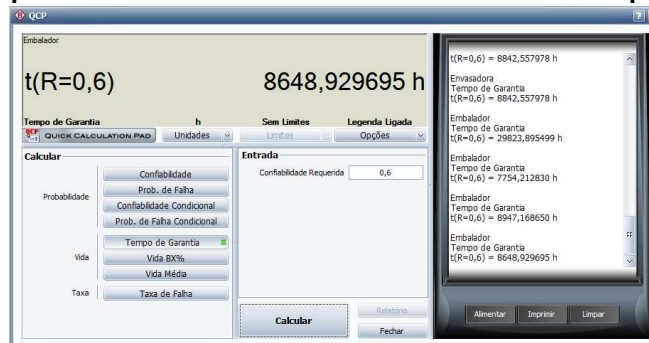
Fonte: Autoria própria (2019)

Como pode-se observar na Figura 19, com esses valores de β e η , obtêm-se um tempo de garantia de aproximadamente 8.850 horas, valor que se aproxima a 8.760h, tempo de garantia definido para uma envasadora.

4.2.1.7 Embalador

Utilizando as mesmas estratégias anteriores, foi definido um tempo de garantia de 1 ano (8.760h) além de um β (beta) igual 1,3 e um η (eta) igual a 14.750, para que resulte na confiabilidade requerida, como demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Embalador com $\beta = 1,3$ e $\eta = 14750$



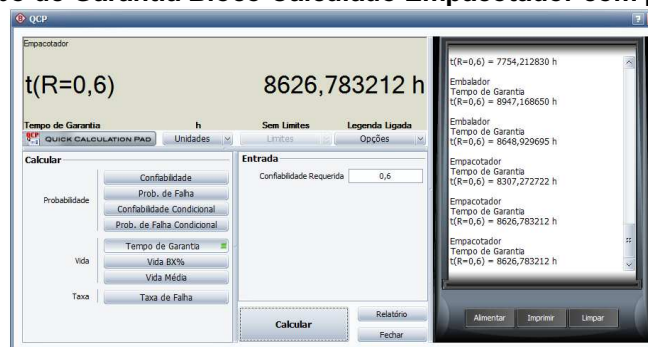
Fonte: Autoria própria (2019)

O tempo de garantia obtido com esses valores de β e η foi de aproximadamente 8.650 (Figura 20), valor próximo do tempo de garantia de 1 ano definido para este elemento.

4.2.1.8 Empacotador

Para o elemento empacotador do sistema, o tempo de garantia encontrado em sites de venda foi de 1 ano (8.760h) e, através dos cálculos realizados, os valores de β e η que resultam na confiabilidade requerida nesse tempo foram de 1,5 e 13.700 h respectivamente (Figura 21).

Figura 21 – Tempo de Garantia Bloco Calculado Empacotador com $\beta = 1,5$ e $\eta = 13700$



Fonte: Autoria própria (2019)

Como pode-se observar na Figura 21, com esses valores têm se um tempo de garantia muito próximo ao de 1 ano (8.760h).

Após se determinar as distribuições de falha de cada elemento que compõe o sistema de estudo, deve-se agora utilizar uma nova estratégia para se determinar

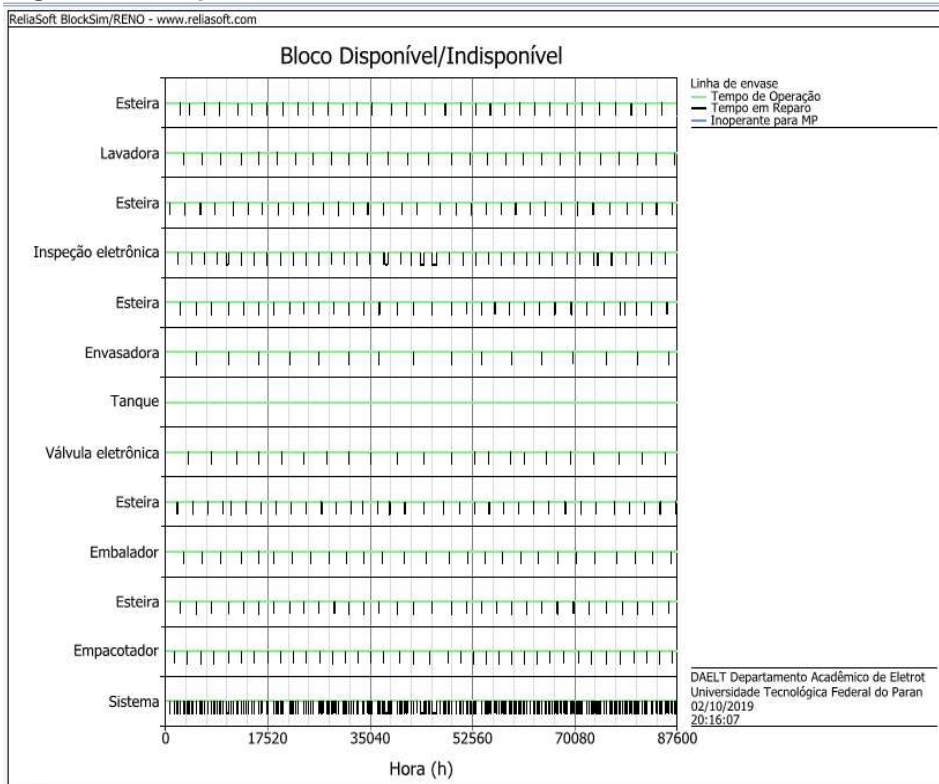
as distribuições de reparo para cada elemento, estratégia que será apresentada na seção 4.2.2.

4.2.2 DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE REPARO

Uma vez montado o diagrama de blocos do sistema e definida a distribuição de falha de cada um de seus elementos, deve-se agora simular o sistema através do *software* BlockSim para observar como o mesmo se comporta com tais distribuições e assim determinar o tempo médio entre as falhas (MTBF).

4.2.2.1 Simulação do sistema com as distribuições de falha encontradas

Como apresentado no Passo 2 da Seção 3.2.1, para se determinar o MTBF do sistema em estudo, deve-se primeiramente simular o sistema no BlockSim, utilizando os parâmetros *beta* (β) e *eta* (η), além MTTR encontrados para cada elemento, para determinar o número de falhas ocorridas em cada um dos elemento do sistema dentro do tempo simulado. Após realizar a simulação do sistema em um período de 1 ano (8.760h), observou-se que nesse período quase não houve falhas nos elementos e conseqüentemente no sistema, por conta da confiabilidade de cada elemento nesse primeiro ano de utilização. Portanto, deve-se aumentar o tempo de simulação para um tempo em que ocorrerão mais falhas no sistema. Simulando o sistema para 10 anos (87.600h), tem-se os seguintes resultados (Figura 23) para a disponibilidade do sistema.

Figura 22 – Disponibilidade e Falhas Ocorridas em Cada Bloco do Sistema

Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que nesse caso o sistema apresenta muito mais falhas decorrente ao grande período de tempo simulado, tornando assim possível determinar o MTBF para cada elemento, dividindo o período simulado de 87.600h pelo número de falhas ocorridas nesse tempo, conforme a metodologia apresentada na Seção 3.2.

4.2.2.2 Determinação do tempo em que ocorrem as manutenções preventivas

As seções a seguir demonstram qual foi o intervalo de tempo determinado para que ocorra as manutenções preventivas de cada elemento do sistema em estudo.

4.2.2.2.1 Esteira

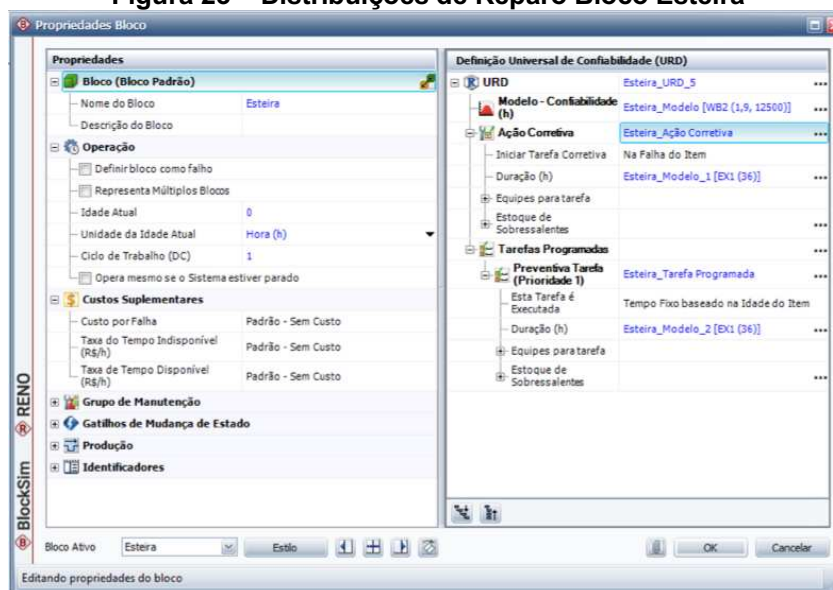
Como apresentado no passo a passo da Seção 3.2.1, para se determinar as distribuições de reparo de um bloco do sistema, ou seja, tanto o período em que serão

feitas as manutenções corretivas e preventivas, deve-se primeiramente contar o número de falhas ocorridas nesse bloco no tempo de simulado.

Como já apresentado, para determinar o MTBF divide-se o tempo de simulação (87.600h) pelo número de falhas ocorridas e considera-se esse resultando como sendo a constante de tempo em que serão realizadas as manutenções corretivas. Segundo Paschich (2016), em uma empresa de classe mundial se prevê que acontecem 6 manutenções preventivas para 1 corretiva, sendo assim para se determinar o tempo em que serão realizadas as manutenções preventivas, dividiu-se essa constante de tempo calculada por 6.

Considerando as falhas ocorridas apenas no bloco esteira no tempo simulado, fora determinado os tempos em que serão realizadas as manutenções corretivas e preventivas deste bloco, como observa-se na Figura 23.

Figura 23 – Distribuições de Reparo Bloco Esteira



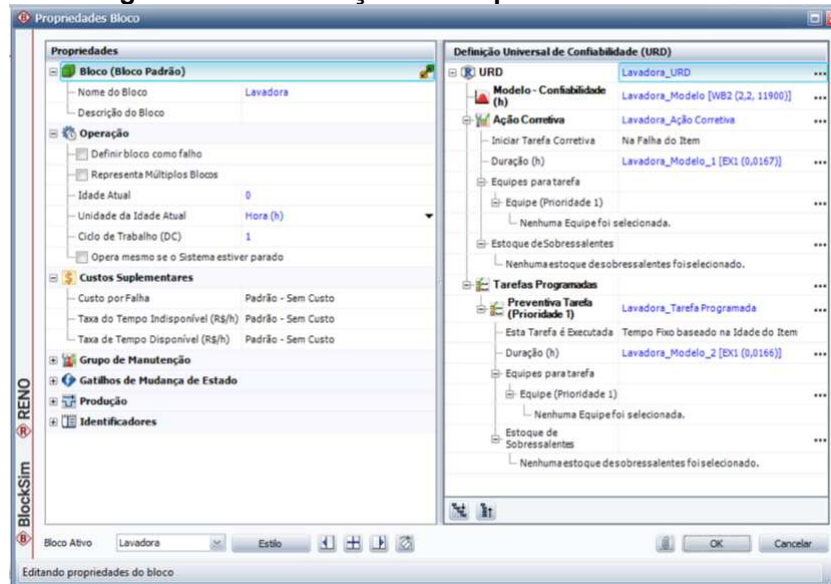
Fonte: Autoria própria (2019)

Utilizando os tempos encontrados para as manutenções corretivas e preventivas e inserindo-os nas configurações de ação corretiva e tarefas programadas, junto com os parâmetros *beta* e *eta* já definidos para esse elemento e o tempo de duração de manutenção, que será definido na próxima seção, é possível concluir o set com todas as propriedades das esteiras do sistema (Figura 23).

4.2.2.2.2 Lavadora

Baseado na mesma metodologia utilizada na seção 3, os dados de reparo para o bloco Lavadora foram:

Figura 24 – Distribuições de Reparo Bloco Lavadora



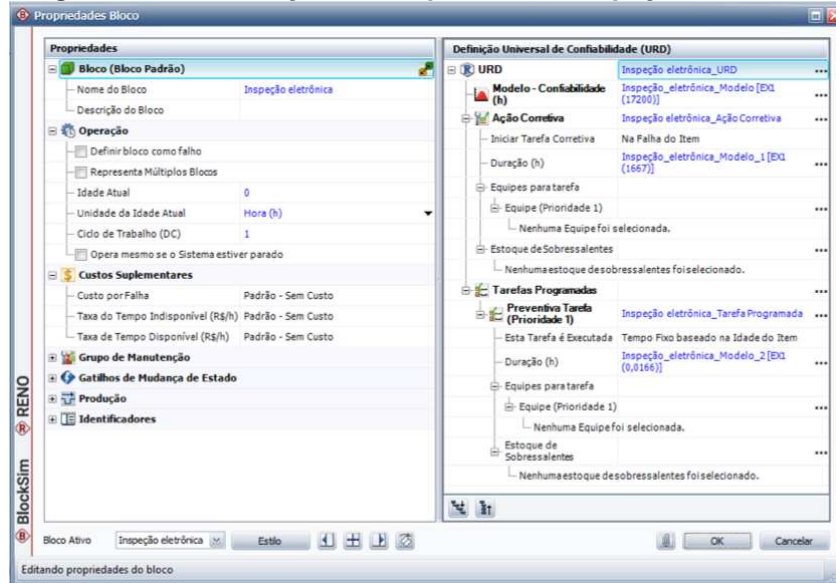
Fonte: Autoria própria (2019)

Uma vez definido os tempos que serão realizadas as manutenções, insere-se essas informações nas propriedades do bloco lavadora como demonstrado na Figura 24.

4.2.2.2.3 Inspeção Eletrônica

Também dividindo o tempo de simulação (87.600h) pelo número de falhas ocorridas no bloco Inspeção Eletrônica e depois dividiu-se por 6, Paschich (2016), para encontrar o tempo em que serão realizadas as manutenções preventivas nesse bloco, têm-se na Figura 25:

Figura 25 – Distribuições de Reparo Bloco Inspeção Eletrônica



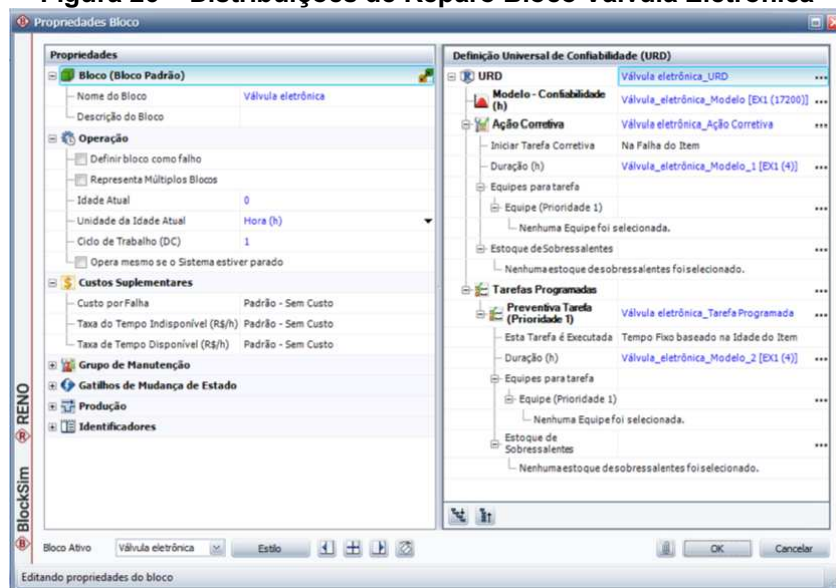
Fonte: Autoria própria (2019)

Inserem-se essas informações nas propriedades do bloco Inspeção Eletrônica, como demonstrado na Figura 25.

4.2.2.2.4 Válvula Eletrônica

Considerando as falhas ocorridas nesse bloco e calculando as constantes de tempo das manutenções corretivas e preventivas, chega-se aos dados que serão inseridos nas propriedades desse bloco conforme apresentado na Figura 26 a seguir:

Figura 26 – Distribuições de Reparo Bloco Válvula Eletrônica



Fonte: Autoria própria (2019)

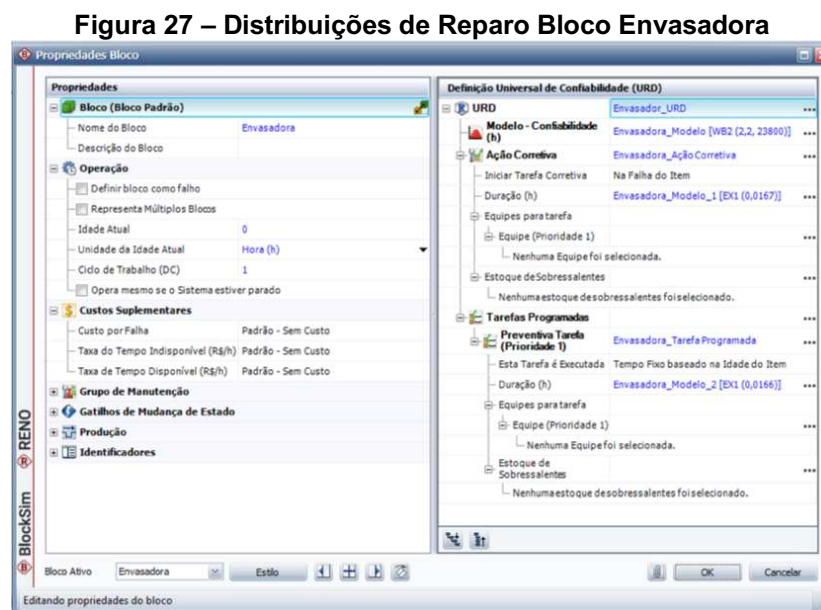
Conforme observado na Figura 26, insere-se as constantes de tempo encontradas para manutenção corretiva e preventiva nas abas “Ação Corretiva” e “Tarefas Programadas” respectivamente.

4.2.2.2.5 Tanque

Considerando que o bloco Tanque é um elemento do sistema em que não ocorrem falhas, ele não possui uma distribuição de reparo.

4.2.2.2.6 Envasadora

Utilizando o número de falhas que ocorridas no bloco Envasadora, chegou-se a seguinte distribuição de reparo (Figura 27).



Fonte: Autoria própria (2019)

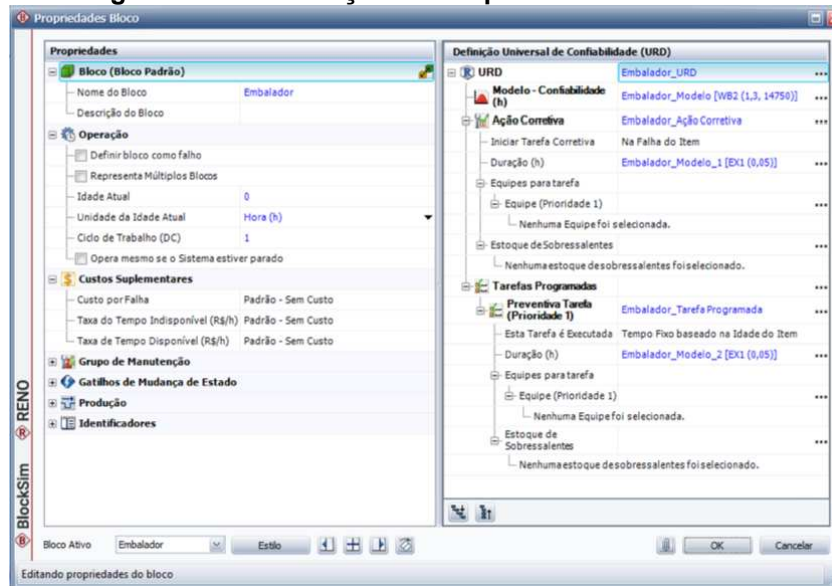
Essas informações são inseridas nas propriedades do bloco envasadora (Figura 27), definindo assim quando serão feitas as manutenções corretivas e preventivas nesse elemento.

4.2.2.2.7 Embalador

Considerando as falhas ocorridas no tempo de simulação no bloco Empacotador e usando os mesmos métodos para o cálculo do tempo em que serão

realizadas as manutenções corretivas e preventivas, as distribuições de reparo calculadas foram as seguintes:

Figura 28 – Distribuições de Reparo Bloco Embalador



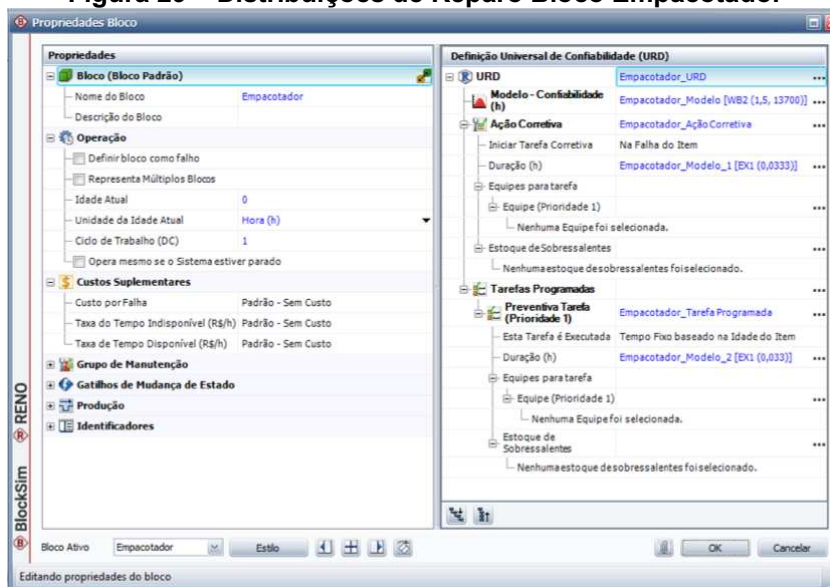
Fonte: Autoria própria (2019)

Feito os cálculos, os resultados são inseridos em sua propriedade, definindo assim a logística de manutenção da embaladora de garrafas do sistema (Figura 28).

4.2.2.2.8 Empacotador

Para o elemento Empacotador, as distribuições de reparo são calculadas usando a mesma metodologia e são inseridas conforme mostra a Figura 29:

Figura 29 – Distribuições de Reparo Bloco Empacotador



Fonte: Autoria própria (2019)

Após se determinar todas as distribuições de reparo de todos os blocos do sistema, deve-se agora determinar os custos relacionados à manutenção, pauta da seção a seguir.

4.2.3 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO

De acordo com o que foi apresentado na Seção 3.3, primeiramente determinou-se quais são os custos de tempo parado que a engarrafadora em estudo apresentou, caso houvesse uma parada imprevista devido alguma falha ou programada pela manutenção de algum elemento do sistema e, feito isso, determinou-se o número de paradas realizadas por ano, para se mensurar quanto essa empresa gastaria por ano em manutenção com paradas imprevistas e previstas.

Para se estimar os custos de manutenção devido às paradas imprevistas e previstas, determinou-se quanto tempo leva para se reparar cada bloco e para que ele retorne à operação, toda vez que esse bloco falha ou sofre uma parada prevista para uma manutenção preventiva. O Quadro 2 demonstra quanto tempo leva-se para reparar cada bloco e quais são os custos de cada uma dessas paradas.

Quadro 2 – Custo por reparo

Bloco	Tempo médio para reparação (h)	Custo por reparo (USD)	Número de médio de falhas por ano

Esteira	36,000	4,99	3,6
Lavadora	0,017	61,67	2,7
Inspeção Eletrônica	0,017	3,65	3,9
Válvula Eletrônica	4,00	1,23	2,2
Envasadora	0,017	431,25	1,6
Embaladora	0,050	90,19	2,7
Empacotador	0,033	76,97	3,8

Fonte: Autoria Própria (2019)

Uma vez determinado todos os custos do sistema, tem-se agora todos os dados necessários para se simular o sistema projetado e estimar sua disponibilidade, principal objetivo desse trabalho. No Quadro 3 encontra-se todos os sets usados em cada bloco para se realizar a simulação do sistema em estudo.

Quadro 3 – Sets de Falha e Reparo utilizados em cada bloco

Bloco	Distribuição de Falha (β , η ou λ)	Execução da Preventiva (h)	Distribuição de Reparo (Corretiva e Preventiva) *Boris(2017), ** Kamil (2018), ***Cadwallader (2012)
Esteira	WB2(1,9; 12500)	2433,33	EX1 (36)*
Lavadora	WB2(2,2; 11900)	2920,00	EX1 (0,017)**
Inspeção Eletrônica	EX1 (17200)	2085,71	EX1 (0,017)**
Válvula Eletrônica	EX1 (17200)	3650,00	EX1 (4,00)***
Envasadora	WB2(2,2; 23800)	4866,67	EX1 (0,017)**
Embaladora	WB2(1,3; 14750)	2920,00	EX1 (0,050)**
Empacotador	WB2(1,5; 13700)	2085,71	EX1 (0,033)**

Fonte: Autoria Própria (2019)

Utilizando todos os dados apresentados no Quadro 3, deve-se agora realizar uma nova simulação e analisar os resultados obtidos para o sistema projetado, conteúdo seção 5.

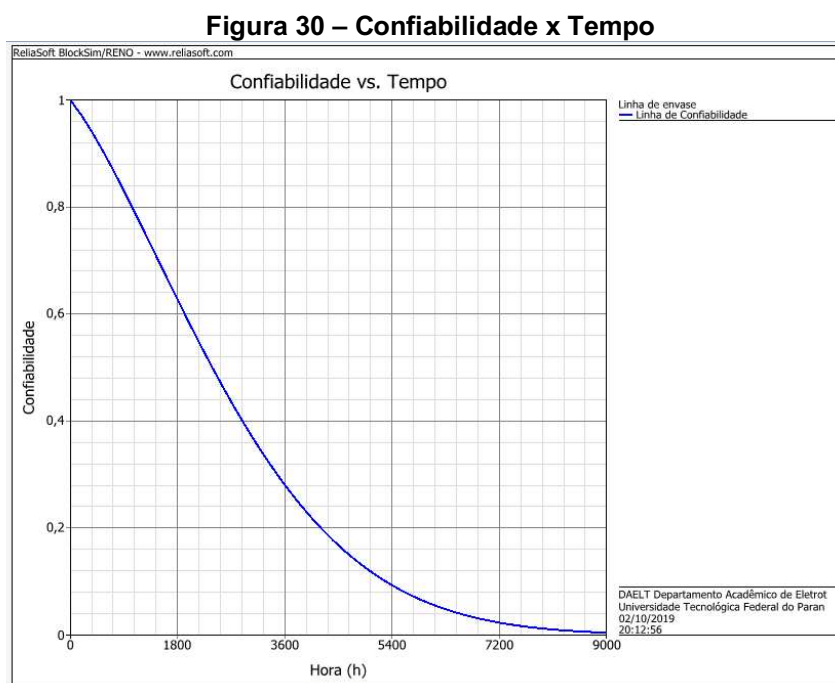
5 RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo serão apresentados os resultados os obtidos através da simulação do sistema em um tempo de 10 anos, considerando todas as distribuições definidas nas seções anteriores.

Feita a determinação de todas as distribuições, tanto de falha como de reparo e de custo de todos os blocos do sistema (Quadro 2 e Quadro 3), inseriu-se esses dados em cada bloco e realizou-se uma nova simulação para encontrar a confiabilidade e disponibilidade do sistema, analisou-se também os gráficos obtidos do processo de simulação do sistema. O *software* BlockSim gerou uma série de resultados, dos quais serão divididos em temas nas próximas seções.

5.1 Curvas

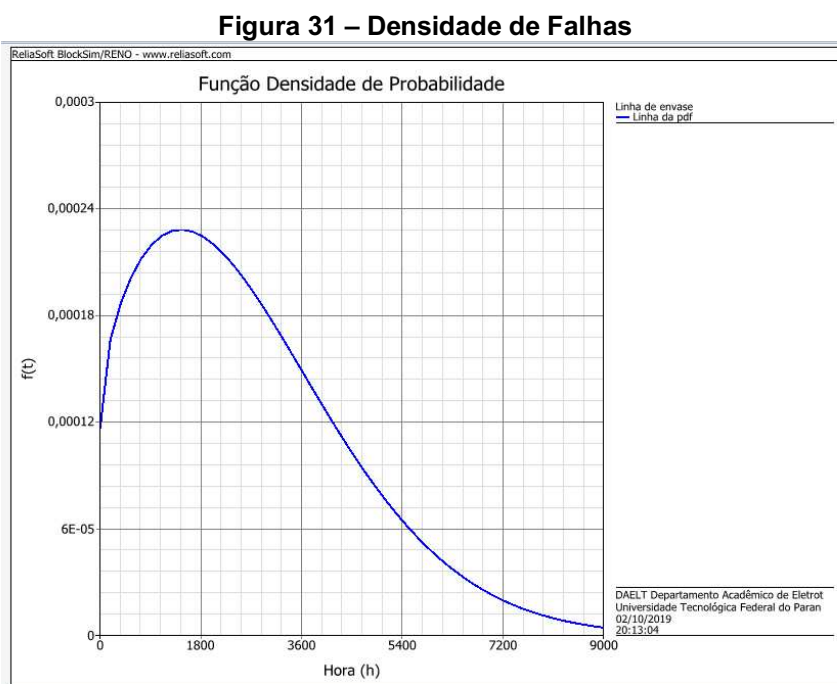
O *software* BlockSim também apresenta uma série de curvas como resultados para facilitar o entendimento do usuário ao analisar o resultado em questão. Uma das curvas apresentadas pelo *software* trata da confiabilidade em razão do tempo de simulação (Figura 30).



Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que a curva da Figura 30 vai caindo com o passar do tempo até chegar a 0 (zero). Isso se deve ao fato que o sistema, assim como qualquer outro, se torna menos confiável com o passar dos anos por conta do envelhecimento que agrava o aparecimento do número de falhas durante os anos.

De acordo com Fogliatto (2009), a função densidade de falhas $f(t)$ representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo. A Figura 31 e Figura 32 apresentam as densidades de falhas do sistema projetado e de cada um dos seus blocos, respectivamente.

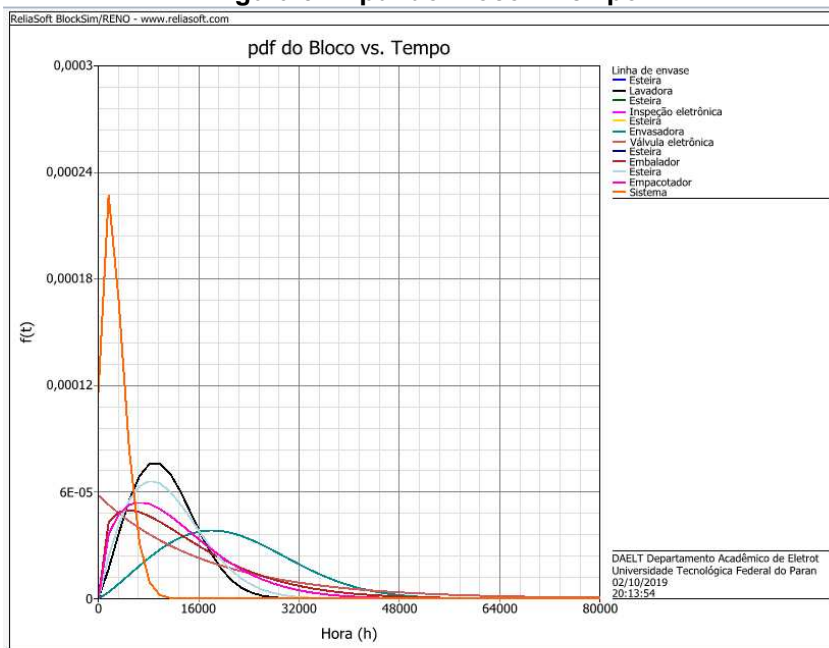


Fonte: Autoria própria (2019)

Analisando a Figura 31, observa-se que a maior probabilidade de ocorrer uma falha no sistema se encontra no começo de sua vida útil, característica esta, devido a um processo de mortalidade infantil que pode ser causada por problemas de fabricação, defeitos de instalação, componentes inadequados, erros no projeto e no controle de qualidade por exemplo. Ao longo do tempo estas falhas vão sendo corrigidas e os componentes entram em um nível de estabilidade também conhecido como ciclo de vida útil do sistema.

Na Figura 32 apresenta-se a pdf de cada elemento em função do tempo:

Figura 32 – pdf do Bloco x Tempo

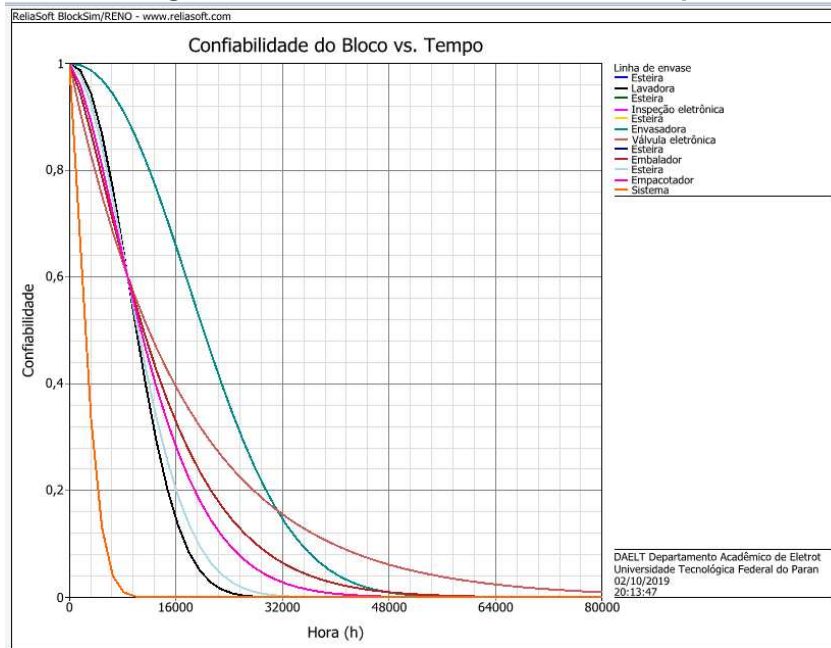


Fonte: Autoria própria (2019)

Como pode-se observar na Figura 32, a maioria dos elementos do sistema possui uma maior probabilidade de sofrer uma falha no começo de sua vida útil (também devido ao processo de mortalidade infantil), fazendo com que o sistema também possua essa mesma característica.

Por último, as outras curvas que foram geradas pelo BlockSim após se simular o sistema, se referem a confiabilidade de cada um dos blocos em função do tempo, além da confiabilidade pontual do sistema como um todo.

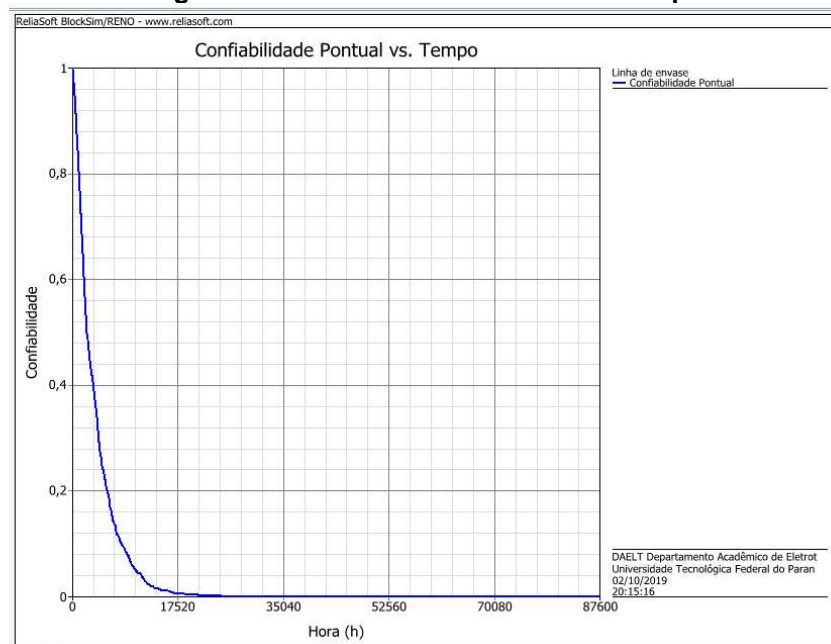
Figura 33 – Confiabilidade do Bloco x Tempo



Fonte: Autoria própria (2019)

Observando as curvas da Figura 33, conclui-se que, com exceção do tanque, todos os outros elementos do sistema tornam-se menos confiáveis com o passar do tempo devido às falhas que ocorreram durante o tempo simulado. Portanto já era de se esperar que o sistema também possuísse a mesma características, conforme pode-se observar na Figura 34:

Figura 34 – Confiabilidade Pontual x Tempo

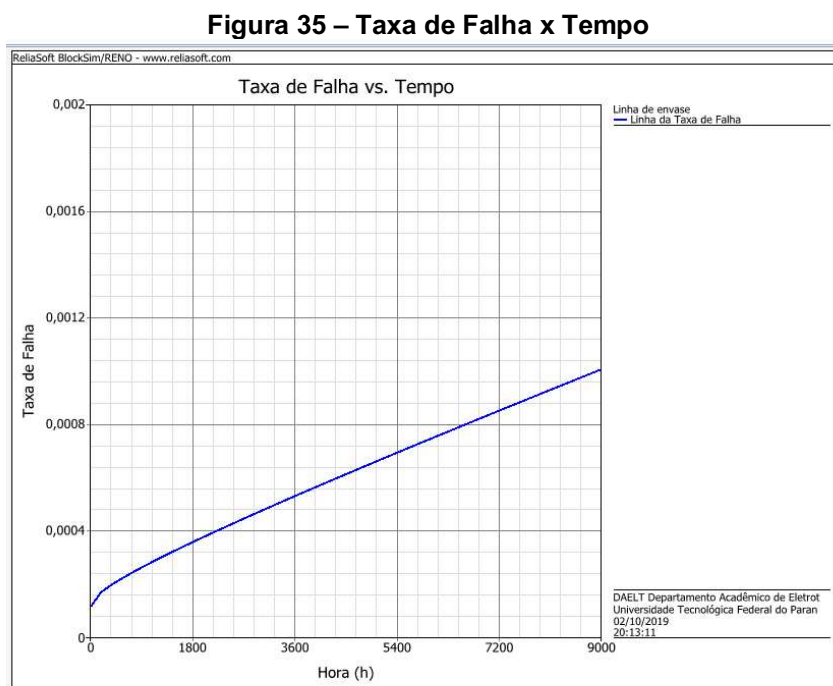


Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se na Figura 34, que o sistema começa a simulação extremamente confiável e com o passar dos anos sua confiabilidade vai caindo drasticamente chegando a zero após os primeiros anos de simulação.

5.2 Falhas

Outros dados que o BlockSim gerou como resultado e que são importantes para a análise do sistema projetado nesse trabalho, foram os dados relacionados as falhas do sistema e de cada bloco. Na Figura 35 e Figura 36 são apresentados os dados de falha do sistema como um todo.



Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que, considerando o resultado apresentado na Figura 35, a taxa de falha é crescente com o passar dos anos, característica que comprova que as falhas que ocorrem tanto o sistema quanto os seus componentes, exceto os eletrônicos, são ocorridas por desgaste. A Figura 36 demonstra a ocorrência de falhas no sistema no decorrer dos anos:

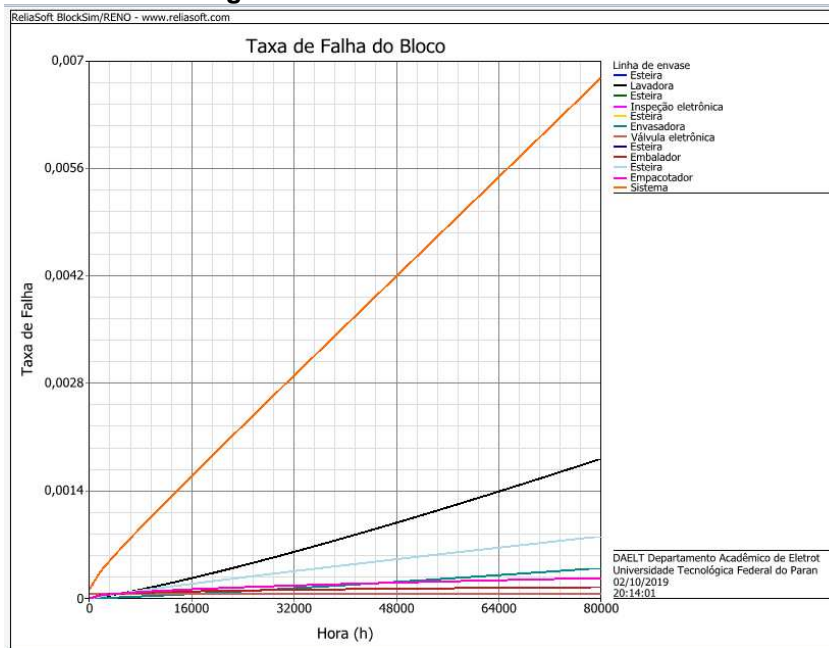
Figura 36 – Falhas do Sistema

Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se na Figura 36, que as falhas do sistema também são representadas por uma reta crescente. Isso se deve porque a maioria dos elementos do sistema possuíam a característica de falha por desgaste, portanto já era de se esperar que a ocorrência de falhas no sistema fosse crescente com o decorrer do tempo.

Outros resultados relacionados às falhas, que também são extremamente importantes para se entender como esse sistema funciona, são os resultados de falhas demonstrados por bloco. A Figura 37 e Figura 38 demonstram a mesma tendência de falha em cada resultado obtido em relação às falhas ocorridas em cada bloco no tempo de simulação realizado.

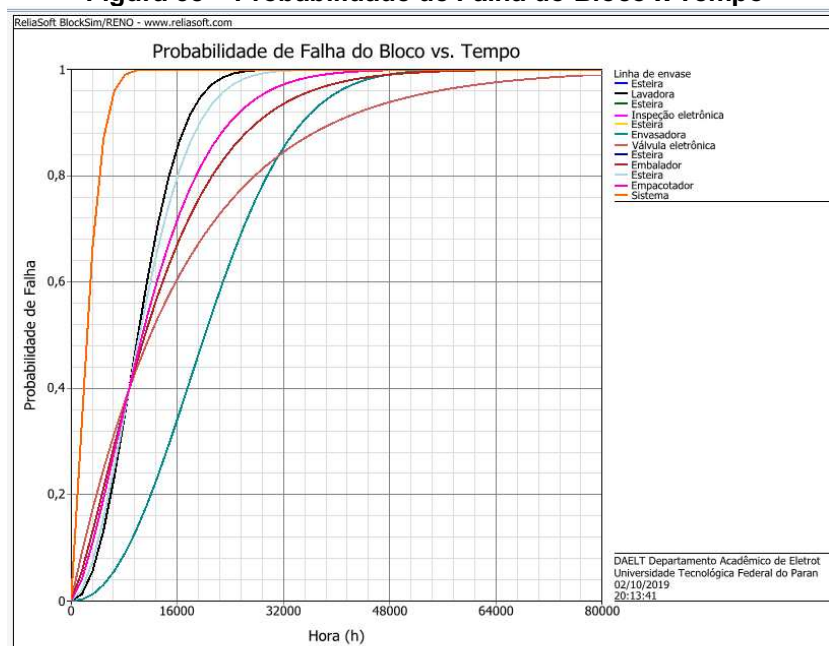
Figura 37 – Taxa de Falha do Bloco



Fonte: Autoria própria (2019)

Analisando os resultados apresentados na Figura 37, é possível verificar a tendência da taxa de falha de cada um dos elementos do sistema em estudo. Observa-se que em todos os elementos mecânicos do sistema a taxa de falha é crescente no decorrer do tempo simulado devido ao desgaste e nos elementos eletrônicos permanece praticamente constante devido a característica de falha aleatória ou diversas variáveis.

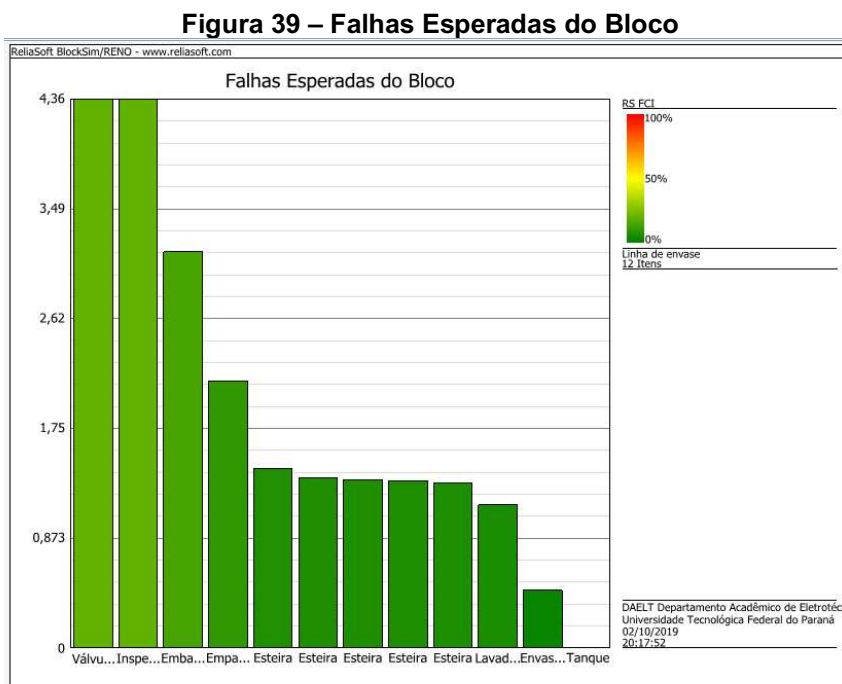
Figura 38 – Probabilidade de Falha do Bloco x Tempo



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 38 é possível verificar o tempo em que há uma maior probabilidade de se ocorrer as falhas em cada elemento e no sistema. Observa-se que a probabilidade de ocorrer uma falha começa pequena no início da simulação, tem seu maior aumento na primeira fase devido ao processo de mortalidade infantil e se mantém lá em cima no decorrer dos anos devido ao desgaste, que agrava o aparecimento do número de falhas, resultando em uma maior probabilidade de falhas ocorrerem.

Ainda tratando de falhas, a Figura 39 a seguir demonstra em forma de gráfico de barras quais são os elementos que mais se esperam falhas durante o tempo de simulação.



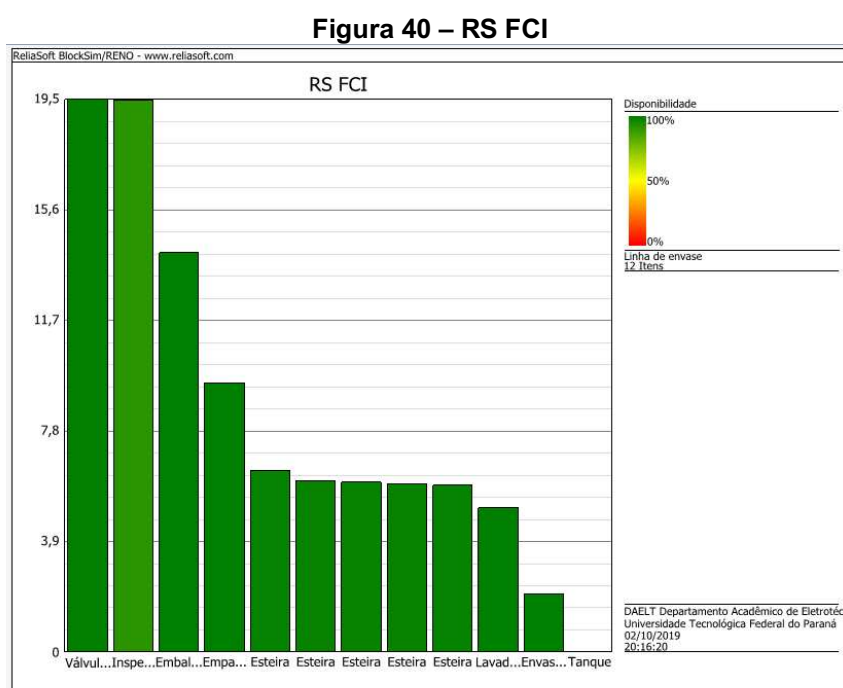
Fonte: Autoria própria (2019)

Levando em conta os resultados apresentados na Figura 39, falhas esperadas por blocos, pode-se concluir que os elementos que mais afetaram a disponibilidade do sistema foram a inspeção eletrônica e a válvula eletrônica, por serem os componentes em que mais se espera que falhas ocorram no decorrer do tempo.

5.3 Importância no Sistema

O *software* BlockSim apresenta em alguns dos seus resultados gráficos que ilustram índices relacionados à importância dos blocos no sistema simulado. Os três índices apresentados nos seus resultados de simulação e que podem ser observados na Figura 40, Figura 41 e Figura 42 são: o RS FCI, o RS DECI e o RS DTCl.

Conforme Reliasoft (2019), o RS FCI (*ReliaSoft's Failure Criticality Index*) é um índice que mostra em porcentagem a relação de vezes em que a falha de um componente causou uma falha no sistema (Figura 40).

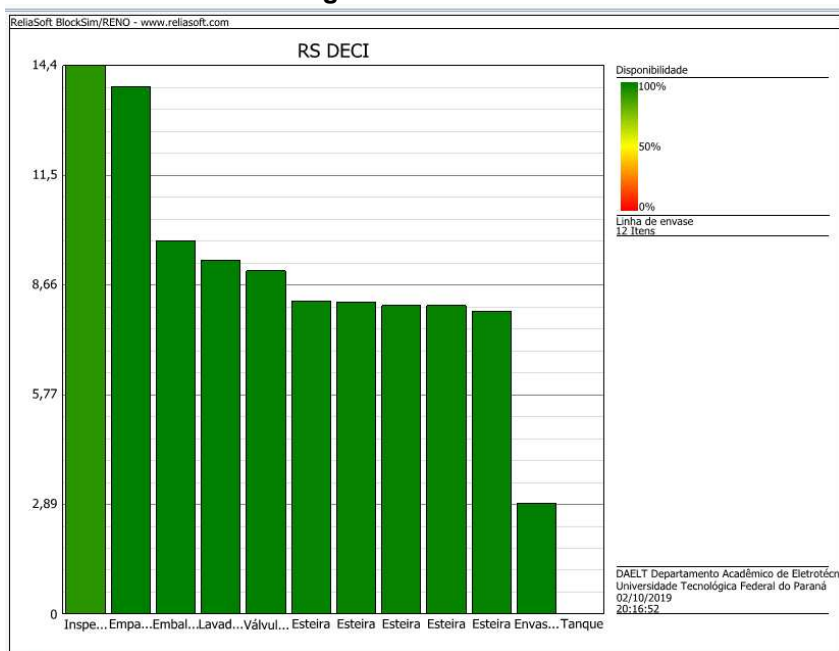


Fonte: Autoria própria (2019)

Portanto analisando o gráfico da Figura 40 com os índices RS FCI, observa-se que as falhas que ocorreram no sistema foram cerca de 39% devido às falhas que ocorreram tanto na válvula eletrônica quanto na inspeção eletrônica, ambas com um índice RS FCI de aproximadamente 19,5%.

O índice RS DECI (*ReliaSoft Downing Event Criticality Index*) mostra a relação em porcentagem em que a ocorrência de um evento de baixa de um bloco causou a baixa do sistema (Reliasoft, 2019). A Figura 41 demonstra esse índice de cada um dos componentes do sistema em estudo.

Figura 41 – RS DECI

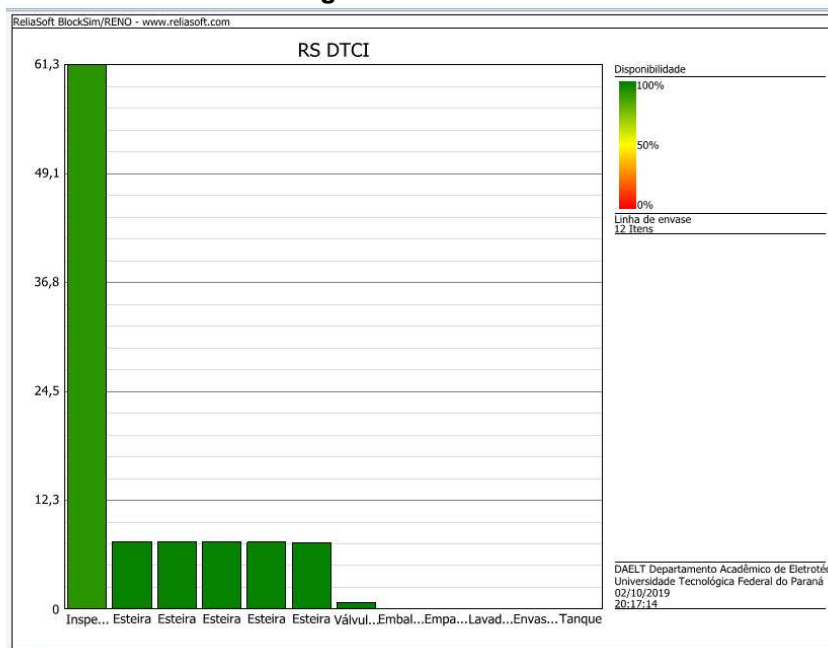


Fonte: Autoria própria (2019)

O resultado da Figura 41 também demonstra que a maior causadora de eventos de baixa do sistema foi a inspeção eletrônica, cerca de 14,4% das vezes em que ocorreram uma baixa do sistema, portanto conclui-se que esse componente é um dos elementos que mais afetam diretamente a disponibilidade do sistema como um todo.

Segundo Reliasoft (2019), o RS DTCl (*ReliaSoft Downtime Criticality Index*) é um índice que demonstra a contribuição de um bloco para o tempo de baixa do sistema (Figura 42).

Figura 42 – RS DTCl



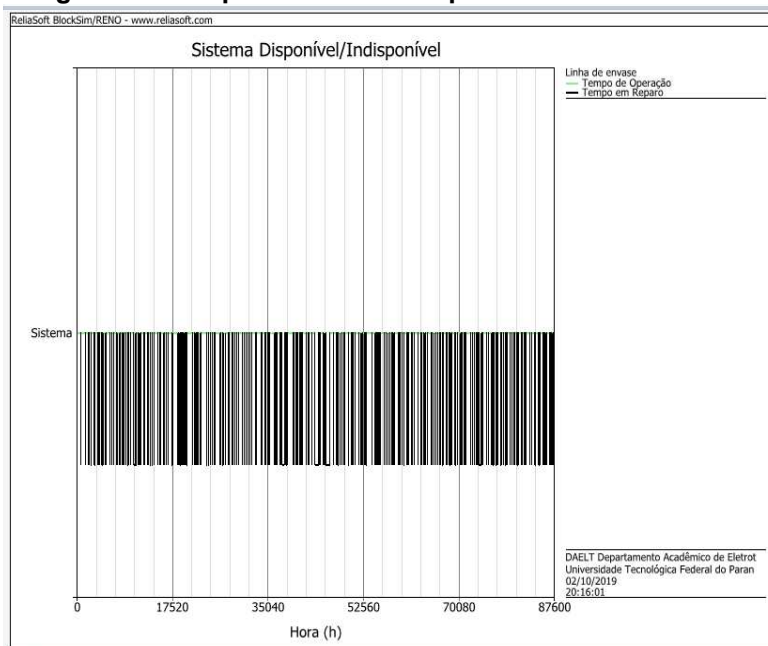
Fonte: Autoria própria (2019)

O resultado apresentado na Figura 42 evidencia ainda mais a importância da inspeção eletrônica na disponibilidade/mantenabilidade final do sistema. Conforme o gráfico da figura, a inspeção eletrônica contribuiu cerca de 61,3% no tempo de baixa do sistema, sendo então o elemento que mais afetou a disponibilidade do sistema projetado.

5.4 Disponibilidade

Foco central nesse trabalho, a disponibilidade do sistema pode ser diretamente definida através da análise dos resultados obtidos pelo BlockSim. Um resultado muito interessante gerado pelo *software* que demonstra a disponibilidade do sistema como um todo pode ser observado na Figura 43.

Figura 43 – Disponibilidade/Indisponibilidade do Sistema

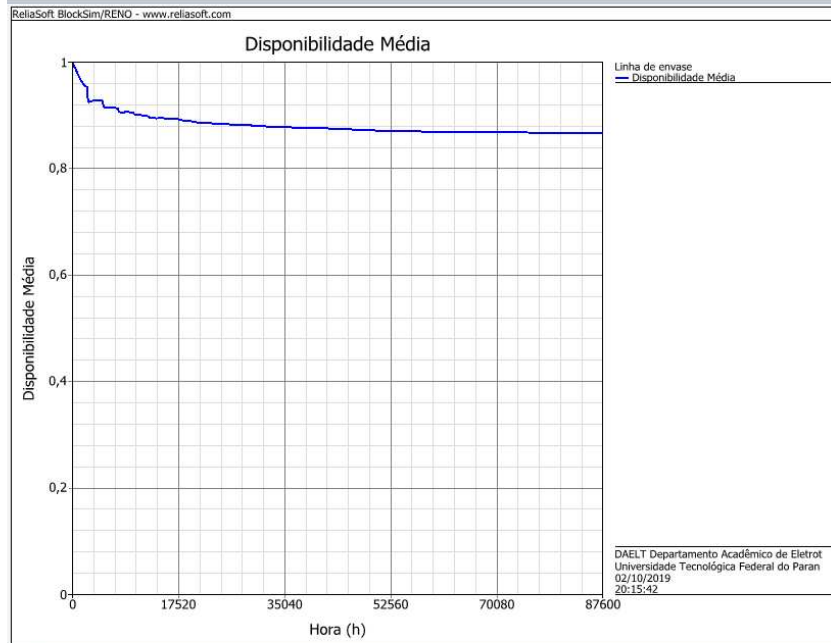


Fonte: Autoria própria (2019)

Analisando o resultado da Figura 43, observa-se que a linha verde na horizontal representa o tempo de funcionamento do sistema e cada barra em preto na vertical, o tempo em que um componente do sistema que falhou, demorou para ser restaurado. Pode-se concluir que cada falha ocorrida em um dos componentes do sistema afeta diretamente no funcionamento de todo o sistema.

Considerando todas as falhas (baixas) do sistema que ocorreram no tempo de simulação a cada vez que um componente se tornava indisponível, o *software* BlockSim calcula a mantabilidade/disponibilidade do sistema e o resultado desse cálculo pode ser visto na Figura 44 com o gráfico de disponibilidade média.

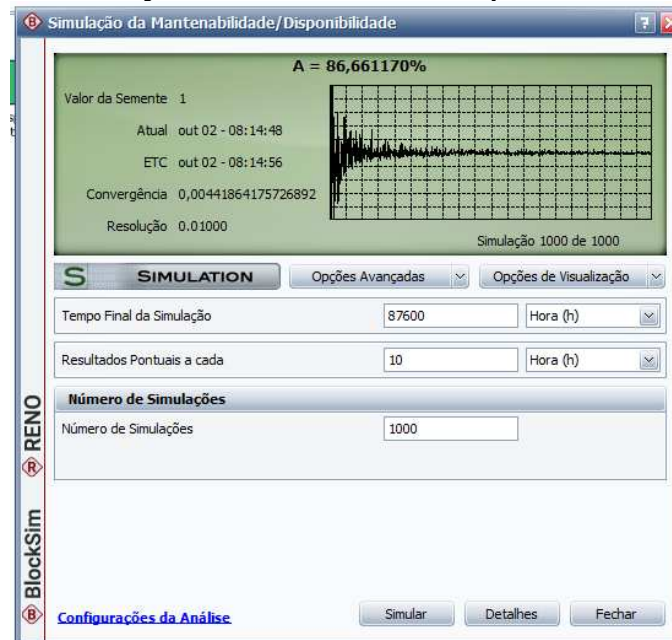
Figura 44 – Disponibilidade Média



Fonte: Autoria própria (2019)

E na Figura 45 o demonstrativo indica o gráfico da convergência da simulação e ao término dela apresenta o valor da disponibilidade média encontrada para o sistema projetado.

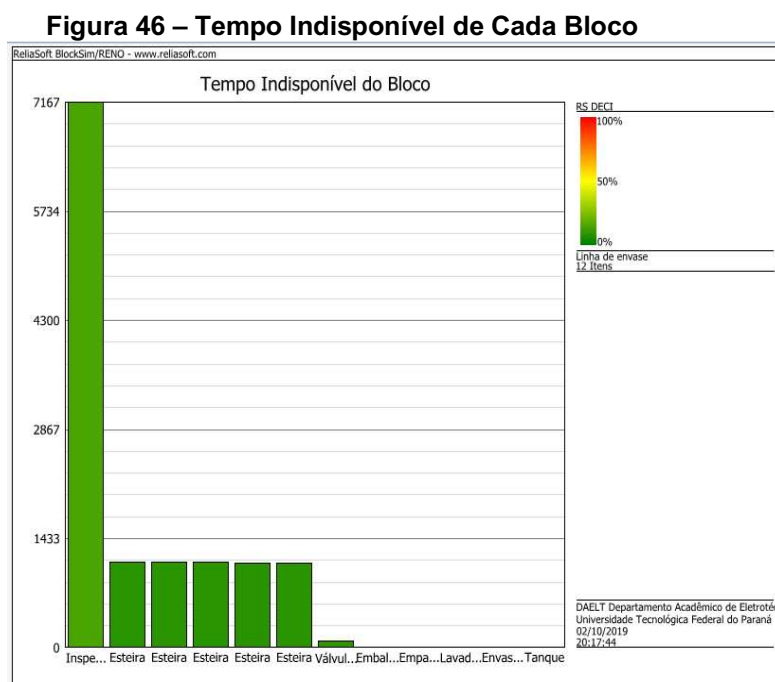
Figura 45 – Simulação da Manutenibilidade/Disponibilidade do Sistema



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 44 e Figura 45 é possível observar que, considerando todas as distribuições de falha e de reparo (manutenção corretiva e preventiva), o sistema projetado permanece cerca de 86,66% disponível (aproximadamente 75.914h) no período simulado de 10 anos (87.600h).

Além do resultado apresentado na Figura 46, um dos resultados mais importantes dessa simulação refere-se ao tempo em que cada bloco que compõe o sistema ficou indisponível no tempo simulado. A Figura 46 demonstra em forma de barras esse resultado obtido através da simulação realizada.



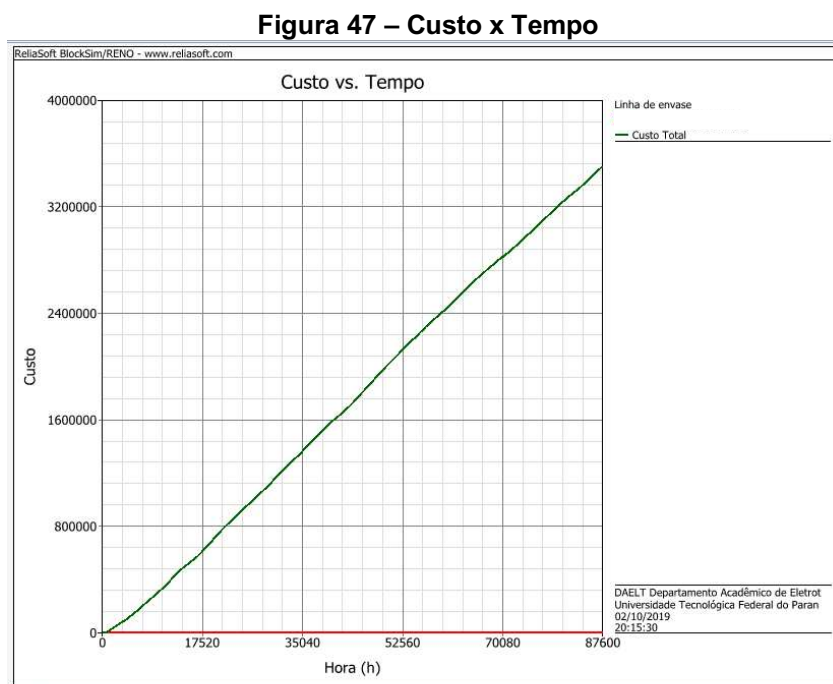
Fonte: Autoria própria (2019)

Com a Figura 47, observou-se que o componente que permaneceu mais tempo indisponível no sistema projetado, considerando o tempo simulado de 10 anos, foi a inspeção eletrônica. Portanto, concluiu-se que esse elemento foi o que mais influenciou na disponibilidade final do sistema.

5.5 Custos

Como apresentado durante o Capítulo 2, a gestão dos custos de manutenção é um dos fatores importantes para que uma empresa permaneça competitiva no mercado. Portanto, analisar como se comporta os custos destinados especialmente

à manutenção do sistema é de extrema importância para que a empresa obtenha sucesso no mercado. No BlockSim entrando com as informações de custo do sistema é gerado um gráfico onde é representado o custo total (soma do custo de mão de obra, sobressalentes e manutenção corretiva e preventiva) em função do tempo simulado. Esse gráfico pode ser observado na Figura 47.



Fonte: Autoria própria (2019)

Analisando a Figura 47, observou-se que o custo total (custo de manutenção corretiva e preventiva, pois nesse estudo não foram considerados custos de mão-de-obra e sobressalentes) é crescente com o tempo e o custo total no fim do tempo simulado de 10 anos é de aproximadamente U\$ 350.000,00, valor que demonstra a importância de se ter uma boa gestão de custo de manutenção, principalmente em empresas de pequeno ou médio porte.

6 CONCLUSÃO

Considerando um mercado competitivo e com pequenas margens operacionais, sistemas de produção em grande escala passam a ser necessários para o crescimento da receita de uma determinada empresa. Dessa forma, garantir um elevado nível de disponibilidade do sistema passa a ser parte da estratégia de sobrevivência desta empresa.

Assim medidas podem ser tomadas desde a etapa de projeto da linha de produção, permitindo a previsibilidade da confiabilidade e disponibilidade da linha, bem como o mapeamento de gargalos e definições de quais serão as possíveis políticas de manutenção para contornar paradas não previstas.

Levando em consideração que existem diversas maneiras de se desenvolver um projeto para a confiabilidade, o trabalho realizado desenvolveu uma nova metodologia de projeto para a confiabilidade considerando um cenário no qual não houvessem dados históricos disponíveis específicos para o caso adotado, uma engarrafadora de médio porte. Desta forma, utilizou-se conhecimentos oriundos de literatura técnica disponível em sítios de internet de fácil acesso, sendo que nestas publicações os elementos poderiam ser utilizados para outros fins que não o de uma engarrafadora de médio porte, utilizou-se uma espécie de “*benchmarking*”.

Entretanto, mesmo partindo de uma situação com escassez de dados de falha e históricos dos elementos, foi possível obter resultados que poderiam ajudar tomadas de decisão durante a fase de projeto de uma linha como a proposta, pois a partir dos resultados obtidos pela simulação foi possível observar um notório gargalo nos ativos eletrônicos, especialmente na inspeção eletrônica, conforme Figura 46.

Além disso, notou-se também que os itens considerados mais importantes para a garantia confiabilidade do sistema em alto nível, conforme Figura 40 foram a inspeção eletrônica e a válvula eletrônica, que não estão dentre os mais caros utilizados no projeto, conforme Quadro 2, assim uma das possíveis medidas para se elevar a confiabilidade da linha seria adicionar um elemento *backup* em paralelo ao principal ou uma redundância em “*standby*” que atuaria imediatamente após a falha do principal, ou ainda poderia se optar pela utilização de um aparelho semelhante de maior confiabilidade consequentemente de alta qualidade.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Por se tratar de uma metodologia que parte do princípio da escassez de dados de confiabilidade dos elementos da linha de produção escolhida, o presente projeto careceu de um meio para fazer a validação dos resultados obtidos.

Para isso a título de trabalhos futuros sugere-se:

- 1) Inserir em um modelo de simulação discreta do sistema, os tempos de falha e reparação encontrados e observar a produção resultante em um período de 10 anos como também às falhas e bloqueios registrados e comparar com a simulação de blocos de confiabilidade;
- 2) Realizar uma análise de sensibilidade nas variáveis de ambos os modelos, discreto e blocos de confiabilidade.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, A. P. Modelagem e simulação computacional de processos produtivos: o caso da cerâmica vermelha de campos dos Goytacazes, RJ. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 9001:2015: Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

BANKS, J. Selecting simulation software. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1991, New York. Proceedings... New York: Association for Computing Machinery, 2000. p. 15-20.

BANKS, Jerry et al. Discrete-Event System Simulation. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

BORIS, G.; PANACHEV, I.; KUZIN, E. “Development of the preventive maintenance system for belt conveyors reducers”. The 1st International Innovative Mining Symposium. Kemerovo, Russia, 2017.

CADWALLADER, Lee C. “Review of Maintenance and Repair Times for Components in Technological Facilities”. 2012. Disponível em: <<https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/5554588.pdf>> Acesso em: 10/11/2019.

CALIXTO, E.; BRETAS, R. “Análise RAM+L: Um estudo integrado de várias unidades de produção de uma refinaria”. 23o Congresso Brasileiro de Manutenção. Santos, São Paulo, 2013.

Cory R.A. Hallam, Ricardo Valerdi, Carolina Contreras, (2018) "Strategic lean actions for sustainable competitive advantage", International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 35 Issue: 2, p. 481-509.

DEPARTMENT OF DEFENSE (DoD), "Test and Evaluation of System Reliability, Availability and Maintainability - 3235.1-H", Washington, 1982

DIAS, Ac.. "Projeto para Confiabilidade: Conceitos e Fundamentos". In: Daniel Capaldo Amaral. (Org.). Gestão do Ciclo de Vida dos Produtos. 1aed. Jaboticabal: Editora Novos Talentos, 2005, v. III, p. 229-243.

DIAS, G. P. P.; CORREA, Henrique L. Uso de simulação para dimensionamento e gestão de estoques de peças sobressalentes. 1998.

FOGLIATTO, F. S. Confiabilidade e manutenção industrial / Flávio Sanson Fogliatto e José Luis Ribeiro Duarte. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FREITAS FILHO, P. J. de. Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena. 2 ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FRIGERI, J. A.; BIANCHI, M e BACKES, R. G. Um Estudo Sobre o uso das Técnicas de Simulação no Processo de Elaboração e Execução dos Planejamentos Estratégicos e Operacional. ConTexto, v. 7, n. 12, p. 1- 24, 2007.

GAVIRA, Marcelo de Oliveira. "Simulação Computacional Como Uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento". Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

GEORGES, Marcos Ricardo Rosa - Metodologia para Modelagem em Simulação de Sistemas: Aplicação em Manufatura Discreta. Campinas, SP, Brasil: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 2005. Tese de doutoramento.

GIL, Antonio Carlos. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOMES, M. T. S. A abertura econômica no Brasil e suas implicações na indústria em cidades médias do Oeste Paulista. Revista Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 10, n. 31, p. 83-91, set. 2009. Disponível em: Acesso em: 23/03/2019.

JUANG, Carlos F. Metodologia Científica – Ênfase em Pesquisa Tecnológica. 3ª ed. 2003. Disponível em: <https://www.ft.unicamp.br/~epoleti/ST008/Metodologia%20F%E1bio.pdf> Acesso em: 10/10/2018.

KAMIL D., KOSICKA, E., MAZURKIEWICZ, D.:. Analysis of The Correctness of Determination of The Effectiveness of Maintenance Service Actions. Management and Production Engineering Review, Lublin, volume 9, número 2, pp. 20-25, junho de 2018.

KOERICH, Alessandro L.. Projeto para Confiabilidade. 2013. 31 slides. Disponível em: <http://eng.eletrica.ufpr.br/~koerich/TE256/5-ProjetoparaConfiabilidade-TE256.pdf>. Acesso em: 24 out. 2019.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation modeling and analysis. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.

LEEMIS L. Reliability: probabilistic models and statistical methods. In: Nova York: Prentice-Hall; 1995.

LIKER, J. K.; MEIER, D. O Modelo Toyota - Manual de Aplicação: um guia prático para a implementação dos 4Ps da Toyota. Porto Alegre: Bookman, 2007.

MARTINELLI, F. B. Gestão da qualidade total. 2009.

MELLO, Braulio Adriano. "Modelagem e Simulação de Sistemas". Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. 2001.

MELLOR, S.J.; SCOTT, K.; UHL, A. & WEISE, D. *MDA Destilada: Princípios de Arquitetura Orientada por Modelos*. Ed. Ciência Moderna. Rio de Janeiro, 2005.

MIYAGI, Paulo E. Introdução a simulação discreta. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo, 2006.

MOUBRAY, J. Reliability centred-maintenance. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

MUNIZ, R. P. D. “Requisitos de Manutenibilidade na Execução dos Serviços de Manutenção”. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul/PPGEP. 2010.

NANCE, Richard E. A history of discrete event simulation programming languages. The second ACM SIGPLAN conference on History of programming languages, p.149-175, April 20-23, 1993, Cambridge, Massachusetts, USA.

PASCHICH, Millen. The 6:1 preventive maintenance golden rule – Gridium. 2016. Disponível em: < <https://gridium.com/preventive-maintenance-golden-rule/> >. Acesso em: 06/11/2019.

PRADO, D. S, do. Usando o Arena® em Simulação. Volume. 3, Belo Horizonte: ING Tecnologia e Serviços, 2010.

PEREIRA, Carla Roberta. “Apostila ARENA 11.0”. Universidade Federal de São Carlos. 2009.

RAPOSO, C. Overall Equipment Effectiveness: aplicação em uma empresa do setor de bebidas do polo industrial de Manaus. *Produção Online*, v.11, n.3, p.648-667, 2010.

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

SATRAN, Joe. Here's How A Six-Pack Of Craft Beer Ends Up Costing \$12 – Huffpost. 2017. Disponível em: < https://www.huffpostbrasil.com/2014/09/12/craft-beer-expensive-cost_n_5670015.html> Acesso em: 15/08/2019.

SCAPIN, C. A. Análise sistêmica de falhas. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1 ed., 1999.

SCHRIBER, Thomas J. Simulation using GPSS. NewYork, NY:Wiley,1974.

SHANNON, Robert E. Systems simulation: the art and science. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall,1975.

SHANNON, R. E. *Introduction to the Art and Science of Simulation*. Winter Simulation Conference. IEEE Computer Society Press Los Alamitos, CA, USA, 1998.

SILVA, Fabrício Carvalho. “Um Estudo Sobre Simulação de Eventos Discretos”. Universidade Estadual de Campinas. 2014.

TSANG, A. H. C. Strategic dimensions of maintenance management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 8 n. 1, p.7-39, jan-abr 2002.

VIEIRA, Guilherme Ernani. Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais. SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XIII, Bauru,Anais,p.1-10,2006.

WEBER, Al., THOMAS, Ron.Key Performance Indicators: Measuring and managing the Maintenance Function. IVARA. Burlington, 2005.

XENOS, H. G. Gerenciando a manutenção produtiva. 1ª. ed. São Paulo: INDG TecS, 2004.

ANEXO A – Módulos de Dados do ARENA

Entre os diversos módulos do *software* ARENA, há um módulo que é destinado à simulação de linhas de alta velocidade e grande quantidade de elementos, como engarrafadoras e empacotadoras, chamado *Packaging*. Neste módulo encontra-se as seguintes ferramentas, sendo cada uma delas descritas por Pereira (2009) como:

- *Machine*: neste módulo define-se os elementos de processamento do sistema, além de suas características opcionais, tais como perda, paradas programadas, trocas, confiabilidade e controles. Há quatro tipos gerais de máquinas disponíveis para fins de modelagem: máquinas básicas, de montagem, de enchimento e de transporte;
- *Coveyor*: neste módulo define-se os elementos de transporte que se moverão através do sistema, por exemplo esteiras acumulativas das quais permitem que os produtos se movam sem que haja esforço da mão de obra;
- *Machine Link*: módulo usado para conectar dois módulos *Machine*;
- *Conveyor Link*: módulo utilizado para conectar dois módulos *Transporter*;
- *Merge*: utiliza-se este módulo para mesclar dois ou mais fluxos de entrada em esteiras acumulativas juntando em um único fluxo de saída, podendo também atribuir o nome do produto ao fluxo de saída;
- *Split*: o módulo *Split* divide um único fluxo de produto de entrada em dois ou mais fluxos de saída através de percentagens para se determinar as proporções de fluxo de saída;
- *Switch*: utiliza-se este módulo para regular o fluxo de um único fluxo de entrada em duas correntes de saída (uma esquerda e outra direita). O fluxo pode ser regulado ou por ondas de produto, através de ações discretas, ou por contagem de unidades;
- *Operator*: o módulo *Operator* define um operador que pode ser atribuído às atividades no sistema. As atividades incluem trocas de aparelho, reparos do dispositivo, e paradas programadas de dispositivos;
- *Operator Group*: este módulo pode ser usado em conjunto com o módulo de operador para definir um grupo de operadores que podem ser referenciados com um nome comum;

- *Operator Schedule*: neste módulo define-se horários para os operadores (individuais ou grupos). A programação é baseada no planejamento do horizonte, com um estado de disponibilidade do operador associado a cada intervalo de tempo;
- *Palletizer*: define o fim de uma linha onde as unidades são armazenadas em paletes ou removidas. A paletizadora transporta unidades individuais de um processo de alta velocidade em paletes discretos;
- *Storage*: módulo utilizado em conjunto com o módulo *Palletizer*, este módulo permite que se especifique os parâmetros de uma área de armazenamento, bem como animação e estatísticas;
- *Valve*: neste módulo regula-se o fluxo de fluidos dentro ou fora de um tanque ou entre dois tanques;
- *Tank*: este módulo é normalmente utilizado em combinação com uma ou mais válvulas e uma máquina de enchimento, e pode também ser usado para representar um recipiente;
- *Production Plans*: neste módulo define-se os parâmetros para os planos de produção;
- *Actions*: módulo útil para a modelagem lógica de entidade discreta que altera o status do sistema, mas que não está diretamente dependente de equipamentos como sensores ou controles;
- *Label*: módulo usado para identificar uma determinada parte da lógica do modelo, em que entidades distintas podem ser enviadas facilmente ao rótulo de outros locais no modelo;
- *Simulate*: neste módulo define-se as opções de execução avançadas para uma experiência de simulação, tais como unidades de medida, os limites do modelo e coleta estatística.