

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

ROGÉRIO MARTINS PEREIRA

**ANÁLISE RAM DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UMA LINHA DE
LAMINAÇÃO DE TIRAS A FRIO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2019

ROGÉRIO MARTINS PEREIRA

**ANÁLISE RAM DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UMA LINHA DE
LAMINAÇÃO DE TIRAS A FRIO**

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

Orientador: Prof. Dr. Eng. Emerson Rigoni

CURITIBA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE RAM DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UMA LINHA DE LAMINAÇÃO DE TIRAS A FRIO

por

ROGÉRIO MARTINS PEREIRA

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

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

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

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

Dedico este trabalho a Deus, minha esposa e meus filhos por sempre me inspirarem a encarar novos desafios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me proporcionou tudo que eu precisava, na hora certa e na medida certa.

Agradeço também, à empresa ArcelorMittal por incentivar a minha participação nesta especialização. E aos meus colegas de trabalho que me apoiaram nos desafios deste trabalho.

Agradeço aos professores que compartilharam seu conhecimento ao longo deste curso. Especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Eng. Emerson Rigoni, por me guiar neste desafio.

Agradeço aos meus colegas de sala pelo apoio prestado.

Agradeço a minha esposa pela compreensão e apoio durante este período.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que de algum modo me ajudaram a vencer este desafio.

RESUMO

PEREIRA, Rogério Martins. **Análise RAM do sistema de automação de uma linha de Laminação de Tiras a Frio.** 2019. 70 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A competitividade da indústria está diretamente relacionada com o nível de disponibilidade dos seus equipamentos. Um equipamento que falha pouco ou que apresenta condições de reparo rápido, tem impacto determinante para os bons resultados da companhia. A engenharia de confiabilidade tem papel fundamental neste cenário e traz ferramentas para que o nível de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos ou sistemas possam ser medidos, estudados e melhorados. Este trabalho apresenta a metodologia utilizada para realizar a análise de confiabilidade e manutenibilidade do sistema de automação de uma linha de Laminação de tiras a frio. Ele apresenta propostas de melhoria desses indicadores e consequente aumento de disponibilidade da linha de produção. Para tal, o sistema é modelado utilizando o diagrama de blocos de confiabilidade. Através de informações históricas de falhas e reparos dos equipamentos, são determinados e analisados os valores de confiabilidade e manutenibilidade através de modelos conhecidos. Simulações são realizadas com as propostas de melhoria e as melhores propostas são aplicadas com o objetivo de aumentar a disponibilidade do equipamento.

Palavras-chave: Competitividade. Confiabilidade. Manutenibilidade. Disponibilidade.

ABSTRACT

PEREIRA, Rogerio Martins. **RAM analysis of a Tandem Cold Mill Automation System.** 2019. 70 pages. Monography (Specialization in Reliability Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2019.

The competitiveness of the industry is directly related to the level of availability of its equipment. An equipment that fails very little or that has fast repair conditions has a decisive impact on the good results of the company. Reliability engineering has a key role in this scenario and brings tools so that the level of reliability and availability of equipment or systems can be measured, studied and improved. This work presents the methodology used to perform the reliability and maintainability analysis of the automation system of a Continuous Tandem Cold Mill. It presents proposals to improve these indicators and consequently increase the availability of the production line. For this, the system is modeled using the reliability block diagram. Through historical information on equipment failures and repairs, reliability and maintainability values are determined and analyzed using known models. Simulations are carried out with the improvement proposals and the best proposals are applied in order to increase the availability of the equipment.

Keywords: Competitiveness. Reliability. Maintainability. Availability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Localização ArcelorMittal Vega.....	21
Figura 2.2 - Linha acoplada de decapagem e laminação.....	22
Figura 2.3 - Laminador de tiras a frio de 4 cadeiras.....	25
Figura 3.1 - Densidade de Probabilidade Abaixo da Curva, entre a e b.....	29
Figura 3.2 - Função de Distribuição Acumulada.....	30
Figura 3.3 - Relação entre pdf e cdf.....	30
Figura 3.4 - Função Densidade de Probabilidade Gama.....	33
Figura 3.5 - Função Densidade de Probabilidade Weibull.....	34
Figura 3.6 - Configuração Série.....	37
Figura 3.7 - Configuração Paralela Simples.....	37
Figura 3.8 - Configuração Sistema k de N.....	38
Figura 4.1 – Arquitetura simplificada do sistema de automação.....	40
Figura 4.2 – Diagrama de blocos do sistema.....	41
Figura 4.3 - Rede de painéis remotos TCJ01.....	43
Figura 4.4 – Rack do controlador PEJ01.....	44
Figura 4.5 - Diagrama de blocos do controlador PEJ01.....	44
Figura 4.6 - Rack e diagrama de blocos do controlador PXJ01.....	45
Figura 4.7 - Rack e diagrama de blocos do controlador TEJ01.....	45
Figura 4.8 - Rack e diagrama de blocos do controlador TCJ01.....	46
Figura 4.9 - Rack e diagrama de blocos do controlador TXJ01.....	46
Figura 4.10 - Configuração de rack dos controladores PEK01 e P XK01.....	47
Figura 4.11 - Configuração de rack dos controladores TEK01, TCK01 e TXK01.....	48
Figura 4.12 - Diagrama de blocos das redes de comunicação.....	49
Figura 4.13 - Simulação do sistema no <i>BlockSim</i>	53
Figura 4.14 - Confiabilidade Pontual do sistema.....	54
Figura 4.15 - Falhas no sistema.....	54
Figura 4.16 - Probabilidade de falha da placa GEN100.....	56
Figura 4.17 - Tempo de indisponibilidade do sistema.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Utilização de cartões remotos nos controladores.....	43
Tabela 4.2 – Modelos de Confiabilidade dos componentes do sistema.....	50
Tabela 4.3 - Modelos de manutenção corretiva	51
Tabela 4.4 - FCI por modelo de componentes do sistema.....	55
Tabela 4.5 - Informações sobre DTCl por modelo de componente.....	58
Tabela 4.6 - Tempo de parada por falha	60

LISTA DE SIGLAS

cdf	Função distribuição acumulada
fdc	Função distribuição acumulada
fdp	Função densidade de probabilidade
FTA	Análise de árvore de falhas
MTBF	Tempo médio entre falhas
MTTF	Tempo médio até a falha
MTTR	Tempo médio de reparo
pdf	Função densidade de probabilidade
PLC	Controlador lógico programável
RAM	Confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade
RBD	Diagrama de blocos de confiabilidade

LISTA DE SÍMBOLOS

∞	Infinito
γ	Parâmetro de forma na distribuição Gama
λ	Parâmetro de escala na distribuição Gama
β	Parâmetro de forma na distribuição Weibull
η	Parâmetro de escala na distribuição Weibull

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
1.4	PRECEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	ÁREA DE APLICAÇÃO	19
2.1	A EMPRESA ARCELORMITTAL.....	19
2.2	A ARCELORMITTAL NO BRASIL	19
2.3	A ARCELORMITTAL VEGA	20
2.4	LINHA DE LAMINAÇÃO A FRIO CONTÍNUA	22
2.4.1	LINHA DE DECAPAGEM	23
2.4.2	LAMINADOR A FRIO	24
2.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	26
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	27
3.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE...27	
3.2	MEDIDAS DE CONFIABILIDADE	27
3.3	ESTATÍSTICA APLICADA À CONFIABILIDADE.....	28
3.3.1	Função Densidade de Probabilidade.....	28
3.3.2	Função de Distribuição Acumulada	29
3.4	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA	31
3.4.1	Função Confiabilidade.....	31
3.4.2	Tempo Médio Até a Falha – MTTF.....	32
3.4.3	Modelos de Distribuição de Dados de Vida.....	32
3.4.4	Distribuição Gama	32
3.4.5	Distribuição Weibull	33
3.5	CONFIABILIDADE DE SISTEMAS REPARÁVEIS.....	34
3.5.1	Tempo Médio Entre Falhas – MTBF.....	35
3.5.2	Tempo Médio de Reparo – MTTR.....	35
3.5.3	Disponibilidade	35
3.6	DIAGRAMA DE BLOCOS	36
3.6.1	Configuração Série.....	36
3.6.2	Configuração Paralela Simples	37
3.6.3	Configuração Paralela k de N.....	38
3.7	ANÁLISE RAM	39
4	DESENVOLVIMENTO	40
4.1	DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO	40
4.1.1	Diagrama de blocos do Sistema.....	40
4.1.2	Diagrama de blocos dos controladores Principais.....	41
4.1.3	Diagrama de blocos dos controladores Auxiliares.....	47
4.1.4	Diagrama de blocos das redes de comunicação	48
4.2	BASE DE DADOS E MODELAMENTO DO SISTEMA.....	49
4.3	SIMULAÇÃO	52
4.4	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA.....	53
4.5	ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE	57

4.6	ANÁLISE DE MANTENABILIDADE.....	59
4.7	SUGESTÕES PARA MELHORIAS DOS RESULTADOS	61
4.7.1	Manutenção preventiva nas fontes e racks dos controladores.....	61
4.7.2	Melhoria no diagnóstico de falhas	62
4.7.3	Organização de sobressalentes	62
4.7.4	Preparação e teste de sobressalentes	63
4.7.5	Utilização de canais reservas	64
4.7.6	Garantia de disponibilidade de sobressalentes	64
4.8	TRABALHOS FUTUROS	64
5	CONCLUSÃO	66
5.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial movimenta uma fatia considerável na receita mundial. Desde a revolução industrial, o setor cresce ano após ano. Empresas de grande, médio e pequeno porte surgem em todos os países do mundo e mudam a vida na região onde se instalam.

No Brasil, o crescimento industrial ajuda o país se destacar na América Latina, podendo ser considerado um dos países mais desenvolvidos. A cada ano novos investimentos chegam para movimentar ainda mais o setor, seja com capital nacional ou estrangeiro. Enquanto o capital nacional normalmente é aplicado na pequena empresa, o capital estrangeiro é normalmente proveniente de grandes grupos que veem no Brasil grande potencial de crescimento e mão-de-obra de qualidade.

Entre as grandes indústrias do mercado brasileiro destaca-se o setor siderúrgico. Alguns polos industriais já têm história no mercado internacional do aço. Dentre elas podemos destacar as cidades de Vitória no Espírito Santo, Volta Redonda no Rio de Janeiro, Santos em São Paulo, a cidade de Ouro Branco e o vale do aço em Minas Gerais.

A indústria siderúrgica é composta por vários processos que se completam, desde a transformação do minério de ferro até a obtenção dos diversos produtos que podem ser extraídos desta cadeia. O desenvolvimento da área é acentuado de tal forma que, quando uma siderúrgica acaba de ser instalada, alguns de seus equipamentos começam a ser considerados ultrapassados.

Observa-se isto principalmente na área da automação. Os antigos motores de corrente contínua, utilizados para garantir controle preciso de velocidade, mas com elevado custo de manutenção, foram substituídos por motores de corrente alternada com inversores de frequência. Sistemas de controle de processo utilizando instrumentos que garantem um controle de malha fechada perfeito. Sistemas de aquisição de dados que geram históricos do sistema para análise de quebras. Sistemas de modelo matemático com inteligência artificial, que permite a aprendizagem da correção aplicada a uma determinada matéria-prima para que possa ser aplicada novamente. Todas essas inovações acompanham o mercado, que exige melhoria contínua da qualidade do produto para a sua aplicação.

Além dos desafios de melhoria contínua da qualidade, o mercado exige alta capacidade produtiva para garantir a entrega do produto na quantidade necessária,

de forma a não comprometer a produção dos clientes. O equipamento deve estar produzindo o maior tempo possível, ao passo que as paradas para manutenção e reparo devem, na medida do possível, ter impacto mínimo no resultado de produção. Para tal, faz-se necessária uma gestão capaz de se antecipar aos problemas nos equipamentos e mitigá-los de forma ordenada e planejada. A engenharia de confiabilidade possui diversas ferramentas que em conjunto são capazes de aumentar a previsibilidade de falhas e suportar as tomadas de decisão no que diz respeito a falhas equipamentos e sua adequada manutenção.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

A Laminação e Tiras a Frio é uma linha de produção de processo contínuo que tem por objetivo reduzir a espessura da chapa de aço dentro das características de qualidade demandada pelos clientes. Por se tratar de processo produção contínua, um alto nível de desempenho é esperado de cada equipamento de modo que o índice de disponibilidade geral da linha de produção esteja dentro do previsto, e que o tempo disponível de produção seja suficiente para cumprir as metas estipuladas.

A linha de produção estudada neste trabalho foi construída entre 2002 e 2003 e teve início de produção no segundo semestre de 2003. O sistema de automação nesse projeto, desenvolvido em 2000, contou com o que havia de mais moderno na época, o que permitiu fornecer equipamentos com sistemas autônomos, sequências automáticas, controle automático de processo e, conseqüentemente, intervenção humana reduzida.

Uma linha de produção com esse nível de automação traz bons resultados econômicos através da redução de custos operacionais com funcionários. Por outro lado, requer alto nível de confiabilidade nos equipamentos de automação para garantia da disponibilidade dos sistemas e da continuidade operacional da planta.

De forma geral, os equipamentos nem sempre apresentam a confiabilidade para os quais foram projetados por uma série de motivos. No momento em que o ativo começa a apresentar falhas é necessário intervir para restaurar sua condição básica ou até mesmo revisar o projeto para melhorar sua condição inicial. Após dezesseis anos de funcionamento, é esperado e compreensível que o nível de confiabilidade desse sistema de automação esteja reduzindo. Esta redução no nível de

confiabilidade tem impacto relevante na disponibilidade da linha de produção e consequentemente na sua capacidade produtiva.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar a análise RAM do sistema de automação de uma linha de laminação a frio, avaliando seus níveis de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, e propor ações de melhoria para pontos críticos identificados na análise, de modo a reduzir o risco de redução de disponibilidade da linha de produção.

1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Conhecer os índices de confiabilidade do sistema de automação;
- Conhecer os índices de manutenibilidade do sistema de automação;
- Conhecer os índices de disponibilidade do sistema de automação;
- Baseado na análise RAM, identificar pontos críticos que podem ter impacto direto na disponibilidade da linha de produção;
- Propor soluções para eliminar ou reduzir os principais pontos críticos identificados;

1.3 JUSTIFICATIVA

Face à necessidade de manter uma alta taxa de disponibilidade da linha de produção para alcançar os objetivos de produção, é crucial conhecer a contribuição individual de cada equipamento no nos índices de confiabilidade e manutenibilidade da linha.

Após dezesseis anos de operação, o sistema de automação estudado neste trabalho apresenta risco à disponibilidade da linha de produção. O sistema é formado por centenas de equipamentos e a maioria desses equipamentos são placas eletrônicas que já estão obsoletas, ou sistemas de controle e software que não possui assistência técnica de seus fabricantes.

Através deste estudo, será possível avaliar a contribuição do sistema de automação nos índices citados e propor soluções para a melhoria desses índices, buscando manter uma linha de produção com alta competitividade no mercado.

1.4 PRECEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Durante a realização deste trabalho, diversos procedimentos metodológicos serão utilizados de acordo com a etapa do trabalho e o desafio abordado nesta etapa. Aqui são citadas, de forma resumida, as etapas planejadas para realização do trabalho.

Inicialmente será realizada a busca por dados históricos de falhas no sistema de automação durante os dezesseis anos de operação, que será obtida através do banco de dados de paradas produtivas da empresa. Os dados obtidos serão organizados de tal forma que possam apresentar quantidade e tempo de paradas na linha de produção, bem como destacar os equipamentos mais críticos, que tem maior impacto na confiabilidade do sistema.

Serão analisados também os tempos necessários para reparos, substituições, configurações de equipamentos, logística e demais etapas necessárias para colocar a linha de volta a produção após parada devido a falhas nos equipamentos de automação. As dificuldades de cada etapa durante a parada serão avaliadas e fazem parte importante no estudo proposto.

Estes dados serão preparados de forma a conter os tempos de parada e tempos de reparo de cada equipamento, estando prontos para serem utilizados no software Weibull++ e BlockSim da Reliasoft que serão utilizados neste trabalho. Testes de aderência, levantamento das melhores distribuições estatísticas, diagramas de blocos e análise RAM serão realizados para análise do sistema.

Nesta etapa, espera-se mostrar a situação atual e estado futuro de disponibilidade do sistema de automação. Identificar os equipamentos mais críticos

que impactam na disponibilidade e compreender a causa do impacto seja um problema de confiabilidade ou manutenibilidade.

Com os resultados da etapa anterior, serão propostas soluções para melhoria de índices de confiabilidade e manutenibilidade para, conseqüentemente melhorar os índices de disponibilidade do sistema.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será composto por cinco partes, sendo:

- Parte 1 – Capítulo Introdutório: Capítulo 1;
- Parte 2 – Fundamentação Teórica: Capítulos 2 e 3;
- Parte 3 – Procedimentos Metodológicos: Capítulo 4;
- Parte 4 – Conclusões: Capítulo 5.

No capítulo 1 é tratada a introdução deste trabalho. Nele são apresentados os objetivos, a justificativa e procedimentos metodológicos que serão utilizados para alcançar os resultados pretendidos.

No capítulo 2 a área de aplicação do trabalho é abordada. Ele traz as informações do contexto industrial onde o trabalho foi desenvolvido. Neste capítulo também serão apresentadas a empresa e a linha de produção onde será realizado o estudo, de modo que seja compreendido o impacto do presente trabalho.

O capítulo 3 caracteriza-se pela apresentação dos procedimentos e ferramentas da engenharia de confiabilidade utilizadas para desenvolver o trabalho, com a explicação teórica básica para fundamentar a sua utilização. Serão apresentadas distribuições estatísticas e diagramas de blocos responsáveis pela modelagem do sistema bem como as medidas de confiabilidade que serão utilizadas para análise dos resultados. Também serão apresentados os softwares utilizados para modelar e levantar as medidas de confiabilidade citadas anteriormente. Ainda neste capítulo serão apresentados o conceito, a metodologia e as aplicações da análise RAM.

O desenvolvimento do trabalho é apresentado no capítulo 4. Neste capítulo as ferramentas abordadas no capítulo 3 serão colocadas em prática e os resultados analisados de modo a compreender o comportamento do sistema e identificar seus pontos fracos. Resultados de análise de dados de vida dos equipamentos serão determinadas e agrupados em diagramas de blocos para compor o sistema em estudo. Através dos resultados das medidas de confiabilidade do sistema, ações serão propostas para melhoria de resultados de disponibilidade do mesmo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com os dados alcançados e apresenta a sugestão para novos trabalhos.

2 ÁREA DE APLICAÇÃO

O presente trabalho será aplicado na linha de laminação de tiras a frio da ArcelorMittal Vega, localizada sem São Francisco do Sul/SC. Este capítulo aborda características desta linha de produção, bem como o sistema de automação utilizado através de informações sobre os principais equipamentos e suas características mais importantes.

2.1 A EMPRESA ARCELORMITTAL

A ArcelorMittal, resultado da fusão da Arcelor e da Mittal Steel, é a maior empresa siderúrgica do mundo, com cerca de 320 mil empregados, presença em mais de 60 países e capacidade de produção de 130 milhões de toneladas/ano – aços planos, longos e inoxidáveis, o que corresponde a mais de 10% da produção mundial de aço.

Ocupa posição de liderança em seus principais mercados, entre eles o de automóveis, construção, eletrodoméstico e embalagens. O grupo conta com tecnologia de vanguarda e mantém presença destacada no segmento de matérias-primas, além de trabalhar com extensa rede de distribuição.

A ArcelorMittal adota elevados padrões de Responsabilidade Social Corporativa, um compromisso comprovado com a divulgação periódica de indicadores de desenvolvimento sustentável.

2.2 A ARCELORMITTAL NO BRASIL

Constituída no final de 2005, agrupando as empresas Belgo, CST e ArcelorMittal Vega, é a empresa siderúrgica de maior valor do mercado no país. Tem presença destacada nos mercados interno e internacional de aço, ofertando produtos longos (laminados e trefilados) e planos (placas e laminados) de qualidade diferenciada para as mais diversas aplicações, como automóveis, eletrodomésticos, embalagens, construção civil e naval, entre outras.

2.3 A ARCELORMITTAL VEGA

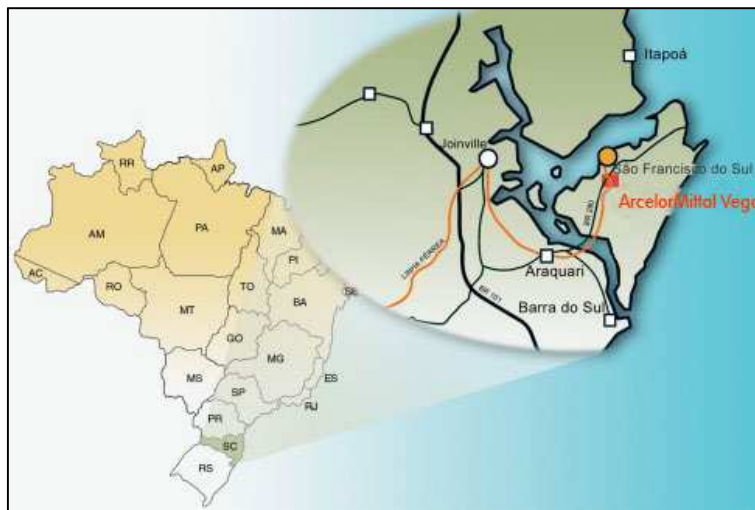
A ArcelorMittal Vega, localizada em São Francisco do Sul/SC, é uma das mais modernas unidades de transformação de aços planos do mundo, operando com avançados processos de decapagem, laminação a frio, recozimento, encruamento e galvanização. A empresa processa bobinas laminadas a quente fornecidas pela ArcelorMittal Tubarão, localizada em Vitória/ES, que são transportadas por meio de um inovador sistema de barças oceânicas.

Tem capacidade de produção de 1,7 milhão de toneladas de aço por ano entre laminados a frio e galvanizado, tendo como principais clientes as indústrias automobilística e de eletrodomésticos, além de empresas de fabricação de tubos e construção civil. A empresa é fruto de um dos maiores investimentos privados da história de Santa Catarina, e gera, no Condomínio Vega, cerca de 1000 empregos.

A operação da ArcelorMittal Vega se iniciou em julho de 2003, através da linha de Galvanização 1. As linhas de decapagem e laminação começaram a operar em setembro e outubro, respectivamente, e até o final de 2003 todas as linhas da unidade industrial estavam em funcionamento, com capacidade de produção de 880 mil toneladas por ano. A inauguração oficial foi em 27 de abril de 2004. A partir de 2010, novos investimentos foram aplicadas na unidade com objetivo de ampliação do parque fabril e da capacidade produtiva. Uma segunda linha de Galvanização foi instalada e outras linhas de produção foram ampliadas, o que permitiu aumento de produção da unidade para 1,4 milhão de toneladas de aço por ano. Outros projetos de investimento foram implantados posteriormente atingindo a produção atual de 1,7 milhão de toneladas de aço por ano.

A cidade de São Francisco do Sul foi escolhida como base da unidade industrial devido a sua localização estratégica em relação às montadoras do Sul e Sudeste do país e do Mercosul, e a proximidade ao porto de São Francisco do Sul, ferrovia e rodovia como pode ser visto na Figura 2.1, onde é apresentado o mapa com a localização da empresa.

Figura 2.1 - Localização ArcelorMittal Vega



Fonte: ArcelorMittal Vega, 2019.

A unidade industrial está totalmente integrada ao meio ambiente. Ocupa uma área de 100 mil metros quadrados, o que representa menos de 5% do terreno de 2,2 milhões de metros quadrados.

Os principais processos produtivos da ArcelorMittal Vega são:

- **DECAPAGEM:** linha responsável pela remoção da oxidação superficial, conhecida como “carepa”, proveniente do processo de laminação a quente.
- **LAMINAÇÃO:** visa obter tiras de aço de baixa espessura, através de uma redução a frio controlada, de forma que o produto seja isento de defeitos e tenha grande homogeneidade de espessura, boa planicidade e rugosidade.
- **UNIDADE DE REGENERAÇÃO DE ÁCIDO:** tem como finalidade o reaproveitamento da solução saturada de cloreto ferroso (FeCl_2) gerada no processo de decapagem.
- **RECOZIMENTO:** tem a finalidade de restaurar as propriedades mecânicas do material perdidas no processo de laminação a frio e desenvolver texturas cristalográficas favoráveis aos processos de conformação dos clientes finais, tal como a estampagem realizada em chapas utilizadas em automóveis e eletrodomésticos.
- **ENCRUAMENTO:** tem a finalidade de ajustar as propriedades mecânicas do material, introduzir a rugosidade no produto final e melhorar a planicidade. Isso é conseguido através da laminação com baixas taxas de redução, as quais também são diferenciadas de acordo com as aplicações dos aços no cliente.

- **GALVANIZAÇÃO:** Sua finalidade é revestir os dois lados da tira laminada a frio com uma fina camada de zinco para proteção contra corrosão. Esta proteção das carrocerias vem a ser, para a indústria automobilística um argumento comercial importante. A ArcelorMittal Vega possui duas linhas de galvanização.

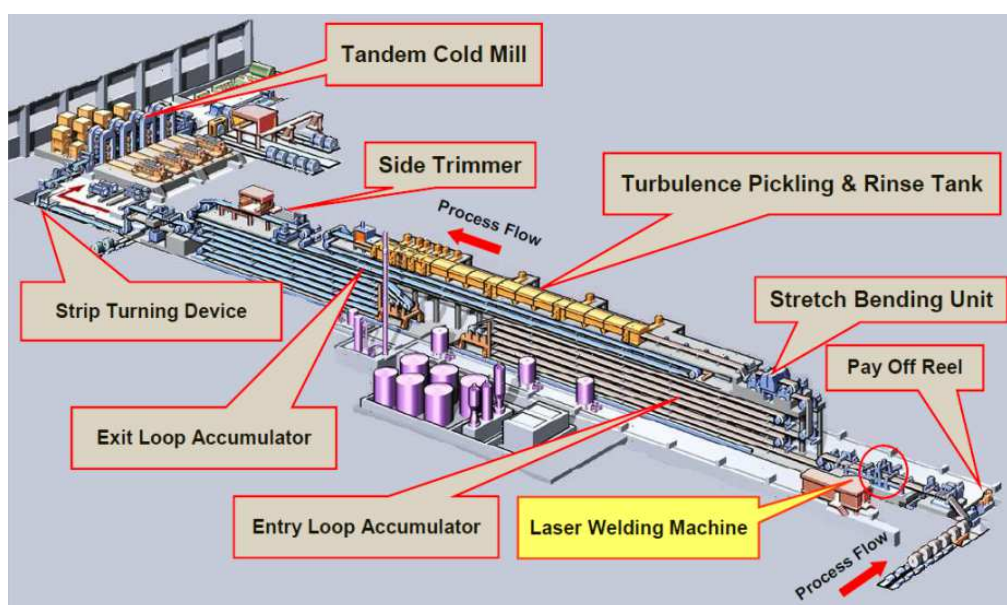
O presente trabalho foi aplicado no sistema de automação da linha acoplada de decapagem e Laminação, que será apresentada a seguir.

2.4 LINHA DE LAMINAÇÃO A FRIO CONTÍNUA

Os principais produtos da ArcelorMittal Vega são as bobinas de aço laminado e frio e aço galvanizado. Para a produção adequada desses produtos, a espessura da chapa deve estar dentro de parâmetros predeterminados. A linha de laminação de Tiras a Frio é responsável por garantir a espessura da chapa.

A linha de produção sob estudo neste trabalho é uma linha acoplada que compreende dois processos, decapagem e Laminação. Ela possui equipamentos que a caracterizam como uma linha de produção contínua, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 - Linha acoplada de decapagem e laminação



Fonte: ArcelorMittal Vega, 2019.

A bobina laminada a quente, matéria prima da ArcelorMittal Vega, é inserida no mandril da entrada da linha de decapagem para ser desenrolada e processada nesta linha. Na entrada da linha a cauda da bobina é soldada na ponta inicial da bobina seguinte através de uma máquina de solda a laser.

A tira de aço passa pelo processo de decapagem para retirada de carepa e por uma tesoura lateral, que é responsável por retirar as bordas da chapa e deixar a tira de aço na largura especificada.

Entre os equipamentos principais existem os acumuladores de tira, que funcionam como uma espécie de pulmão, recebendo e enviando material de acordo com a necessidade, e permitem que cada região da linha de produção possa efetuar pequenas paradas para ajustes sem a necessidade de parar completamente a linha e produção.

Na saída do laminador, após processadas, as bobinas são separadas através de uma tesoura rotativa. Esta tesoura tem capacidade de realizar cortes da tira de aço sem a necessidade de parada da linha.

Após a tesoura existem dois mandris que são responsáveis por enrolar as bobinas produzidas no laminador. Esses equipamentos, conhecidos como enroladeiras, funcionam em paralelo e permitem que a linha funcione continuamente de modo que a bobina seja retirada de uma enroladeira enquanto outra bobina é enrolada na outra enroladeira.

O laminador de tiras a frio em sua composição original produzia uma bobina por vez. Uma bobina com espessura elevada era inserida na entrada do laminador, produzida e retirada com espessura menor na saída do laminador. Este tipo de laminador ainda existe, mas possui produtividade baixa devido ao tempo necessário para inserir e retirar a bobina na entrada e saída da linha.

2.4.1 LINHA DE DECAPAGEM

Para aperfeiçoar a produção, o processo antecedente está acoplado à linha de laminação. Esse processo é conhecido como decapagem e tem papel fundamental no processo de laminação à frio.

É o processo responsável pela remoção da oxidação superficial, conhecida como “carepa”, proveniente do processo de laminação a quente. Esta “carepa” é

constituída de três camadas: Wustita (FeO), Magnetita (Fe_3O_4) e Hematita (Fe_2O_3) e é removida através da aplicação da tira em um banho de solução de ácido clorídrico (HCl). Este banho ataca os óxidos da tira e possui ótima eficiência na remoção destes óxidos e, além disso, melhora o aspecto superficial da tira.

O processo de decapagem com este tipo de ácido é rápido, possuindo alta produtividade e baixo custo. Pode-se trabalhar com variadas temperaturas do banho e concentrações mais baixas que outros processos de decapagem, que em alguns casos, utilizam ácido Sulfúrico.

Além do banho de ácido, outros equipamentos estão incluídos na linha de decapagem para garantir o funcionamento contínuo e o beneficiamento da bobina produzida, tais como máquina de solda, desempenadeiras, acumuladores e tesouras laterais.

2.4.2 LAMINADOR A FRIO

O processo de laminação visa obter tiras finas através de uma redução a frio controlada, de forma que o produto seja isento de defeitos e tenha grande homogeneidade de espessura, boa planicidade e rugosidade.

O processo de laminação a frio consiste em realizar uma deformação do material numa temperatura abaixo da temperatura de recristalização do aço. Esta deformação é realizada por grandes esforços de compressão e tração e, por consequência, gera muito calor.

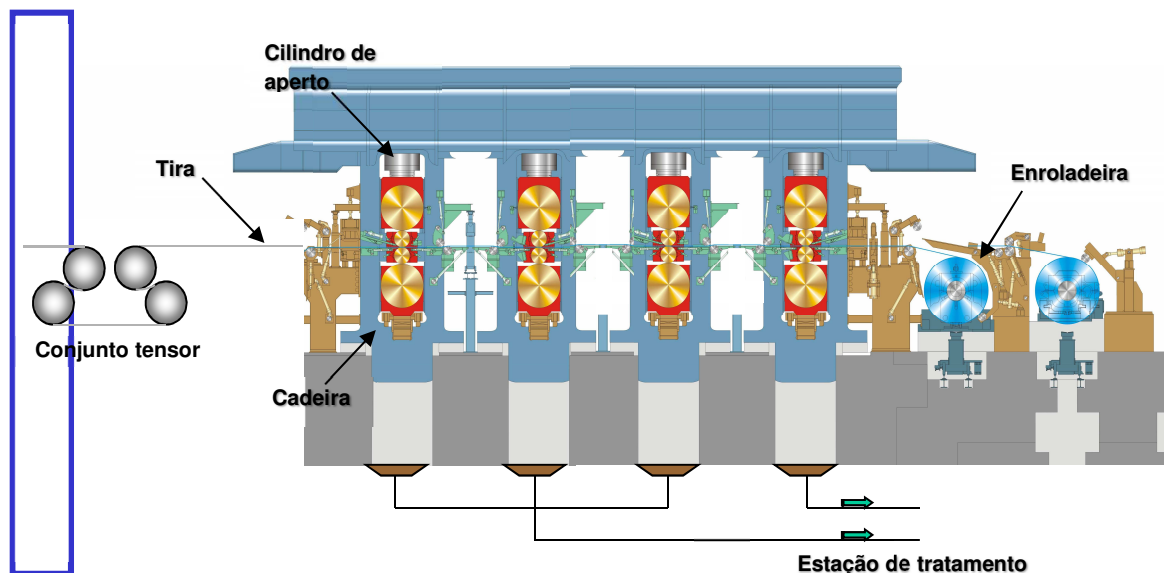
Estes esforços, necessários a deformação, variam diretamente em relação ao atrito e inversamente a tensão aplicada. Para minimizar a ação do atrito, utiliza-se um filme lubrificante (óleo + água) na interface cilindro/tira, que reduz os esforços de compressão da tira. Este mesmo filme atua como refrigerante, removendo o calor gerado durante o processo de laminação.

Os materiais laminados com espessuras menores abrangem mais clientes. Por isso a grande importância da linha de laminação.

A intenção do laminador a frio é reduzir a espessura do material que passa por ele. Para isso vários controles são necessários para garantir a qualidade do produto. Alguns desses controles serão mostrados neste estudo.

O laminador de tiras a frio da ArcelorMittal Vega é composto por quatro cadeiras, como mostra a Figura 2.3. Entretanto existem laminadores compostos de cinco cadeiras de acordo com os materiais produzidos.

Figura 2.3 - Laminador de tiras a frio de 4 cadeiras



Fonte: o autor (2019).

Cadeira é um conjunto de cilindros giratórios, normalmente quatro, sobrepostos sendo que dois deles entram em contato direto com a tira (chapa), um por baixo e outro por cima, para fazer o esforço que provocará a redução de espessura. Esses são chamados cilindros de trabalho.

Na outra face de cada cilindro de trabalho estão apoiados os cilindros de encosto, com diâmetro bem superior ao dos cilindros de trabalho. Os eixos dos cilindros de encosto não têm acionamento, seu giro é causado pelo contato com o cilindro de trabalho.

O cilindro de encosto inferior fica apoiado sobre um sistema de cunha que regula a altura da passagem da tira dentro da cadeira.

Sobre o cilindro da extremidade superior está o cilindro hidráulico de aperto, responsável pela força empregada na cadeira. Este possui áreas extremamente grandes, permitindo uma força de aperto muito elevada.

2.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a informações relevantes sobre a empresa e a linha de produção alvo deste trabalho. Cada parte foi retratada de forma sucinta a fim de dar uma visão de como funciona uma linha de laminação a frio e sua complexidade

No próximo capítulo serão abordadas as ferramentas utilizadas para a execução do trabalho de aumento de confiabilidade.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados conceitos e ferramentas utilizados na condução do presente trabalho. O embasamento teórico em Engenharia de confiabilidade será abordado, enfatizando os Conceitos de Análise de Dados de Vida, Análise RAM (*Reliability, Availability, Maintainability*). Serão mostradas também algumas distribuições estatísticas de análise quantitativa que são fundamentais para a aplicação dos conceitos aqui abordados.

3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Segundo Blanchard & Fabrycky (1990), confiabilidade é uma característica inerente ao projeto e pode ser definida como a probabilidade na qual um sistema ou produto irá operar de modo satisfatório em um dado intervalo de tempo, quando utilizado restrito às condições de operação especificadas.

Confiabilidade também é definida como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo (NBR5462 – 1994).

De forma mais abrangente pode-se definir confiabilidade como a capacidade de um sistema desempenhar a função proposta para este, em um determinado tempo, sob determinadas condições. Nesse caso, sistema pode ser considerado como uma peça ou uma linha de produção complexa composta por diversos equipamentos.

3.2 MEDIDAS DE CONFIABILIDADE

Para a análise de confiabilidade de um sistema são utilizadas algumas métricas que permitem descrever o comportamento dos dados utilizados nas análises. Algumas das principais métricas de confiabilidade são citadas a seguir (Reliasoft, 2019).

Confiabilidade $R(t)$ é probabilidade de um componente, equipamento, ou sistema funcionar até um determinado tempo em uma condição pré-estabelecida.

Probabilidade de Falha ($F(t)$) tem o conceito inverso de da confiabilidade, ou seja, probabilidade de um componente, equipamento, ou sistema de falhar até um determinado, dentro da mesma condição pré-estabelecida.

Vida Média (MTTF) é tempo médio esperado em que o item sob análise funcione antes que ocorra a falha.

Taxa de falha é o número de falhas por unidade de tempo que se espera que ocorra no item em análise.

Vida BX é o tempo estimado em que a probabilidade de falha alcançará o valor de X%. Por exemplo, B10 significa que 10% das falhas ocorrerão nesse intervalo.

3.3 ESTATISTICA APLICADA À CONFIABILIDADE

As medidas de confiabilidade são calculadas a partir de modelos e equações provenientes de estudos estatísticos. Para melhor compreensão do assunto, alguns conceitos e equações são apresentados a seguir.

3.3.1 Função Densidade de Probabilidade

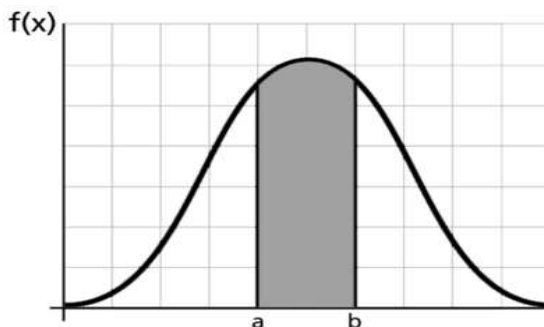
A função densidade de probabilidade (fdp), ou em inglês, *probability density function (pdf)*, é base do estudo de confiabilidade. A partir desta equação, diversas outras serão deduzidas e as principais medidas de confiabilidade serão calculadas.

Sendo uma variável aleatória contínua X , a fdp de X é a função $f(x)$, de modo que, para quaisquer dois números a e b , sendo $a \leq b$ (DEVORE, 2006):

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (3.1)$$

A probabilidade de X ter um determinado valor dentro do intervalo $[a, b]$ é a área contida entre o intervalo e abaixo da função de densidade, então, como pode ser visto na Figura 3.1, a pdf compreende a área sombreada que fica abaixo da curva e está entre a e b .

Figura 3.1 - Densidade de Probabilidade Abaixo da Curva, entre a e b



Fonte: Reliasoft, 2019

No entanto, para que a *fdp* seja válida, a mesma deve satisfazer as seguintes condições:

- 1) $f(x) \geq 0$ para todos os valores possíveis de x
- 2) $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$

Podemos utilizar a *fdp* para “[...] calcular diversas características da população.” (DEVORE, 2006, p. 131), características estas, no caso, as medidas de confiabilidade, disponibilidade, entre outros. Outra função mencionada é a função de distribuição acumulada (*cdf* ou *fdc*), de acordo com o autor em questão, que será abordada a seguir.

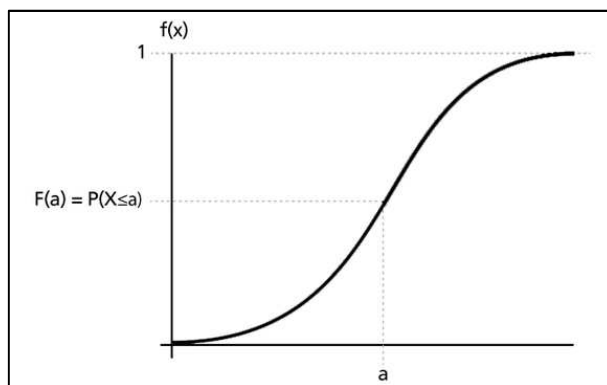
3.3.2 Função de Distribuição Acumulada

A função de distribuição acumulada, ou do *Inglês cumulative distribution function (cdf)* é representada aqui por $F(x)$. Ela “fornece, para qualquer número específico x , a probabilidade $P(X \leq x)$ e é obtida pela integração da *pdf* $f(y)$ entre os limites $-\infty$ e x .” (DEVORE, 2006, p. 133). O valor da *cdf* deverá ficar à esquerda do valor de x selecionado como parâmetro conforme pode ser obtido pela equação (3.2) abaixo.

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(y)dy \quad (3.2)$$

Esta propriedade da função pode ser compreendida, verificando no gráfico da Figura 3.2, onde a área à esquerda de “a” compreende a cdf.

Figura 3.2 - Função de Distribuição Acumulada



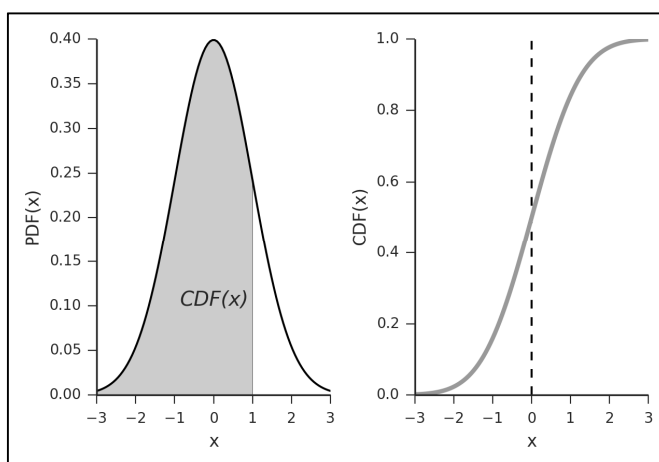
Fonte: http://reliawiki.com/index.php/Statistical_Background (2019)

Conforme apresentado nos conceitos de pdf $f(x)$ e cdf $F(x)$, é possível relacioná-las matematicamente de utilizando a equação 3.3.

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx \quad (3.3)$$

Na Figura 3.3 é possível observar a relação entre pdf e cdf. À esquerda está o gráfico da pdf com a área marcada da integração. À direita está o resultado da cdf.

Figura 3.3 - Relação entre pdf e cdf



Fonte: <http://work.thaslwanter.at/Stats/html/statsDistributions.html> (2019)

Medidas importantes, como a probabilidade de falha $F(t)$ e a confiabilidade $R(t)$, utilizadas na engenharia de confiabilidade podem ser obtidas diretamente pela cdf e serão tratados neste capítulo.

3.4 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

O estudo da expectativa do tempo funcionamento até a falha do objeto em estudo é conhecido como Análise de Dados de Vida (Reliasoft, 2019). A partir de histórico de falhas em componentes, ou mesmo estimativa dessas falhas, é possível criar equações que modelem o comportamento de falha do objeto em estudo. Através desses modelos de distribuição estatística, que representativa dos dados de vida, é possível estimar características importantes do item sob estudo, tal como, confiabilidade, probabilidade de falhas, taxa de falhas, MTTF, entre outros.

3.4.1 Função Confiabilidade

A confiabilidade da unidade pode ser definida como sendo “a sua probabilidade acumulada de sucesso” (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009, p. 10). Já para Mortelari, Siqueira e Pizzati (2014, p. 119) a confiabilidade é definida como “[...] a probabilidade que um item sobreviva a uma específica idade de operação, sob condições específicas de operação, sem falha.”. Trocando em outras palavras, pode ser entendida como a probabilidade que o equipamento tem de funcionar sem falha em um determinado período.

A função confiabilidade é o complemento da função de distribuição acumulada, como pode ser visto na equação (3.4).

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (3.4)$$

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 10) “A função de confiabilidade $R(t)$ é também denominada função de sobrevivência.”, pois ela representa a probabilidade que o item tem de continuar funcionando ao final de um período determinado.

3.4.2 Tempo Médio Até a Falha – MTTF

O tempo médio até a falha (MTTF) (do Inglês *Mean Time to Fail*) é uma medida de confiabilidade utilizada para itens que não são reparáveis. (SMITH, 2011, p. 16, tradução nossa).

Conforme Werner (1996, p. 15) o MTTF pode ser calculado “[...] dividindo o tempo total acumulado de operação pelo número total de falhas.”

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 12) o MTTF pode ser definido pela equação (3.5).

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (3.5)$$

3.4.3 Modelos de Distribuição de Dados de Vida

Distribuições estatísticas são formuladas para modelar ou representar determinado comportamento. A função de densidade de probabilidade (pdf), apresentada anteriormente, é uma função matemática que pode descrever tais distribuições.

Algumas distribuições podem representar corretamente os dados de vida de um equipamento ou sistema através de informações de tempos até falha, e são comumente chamadas de “distribuições de dados de vida”. Entre as diversas distribuições de probabilidade pode-se destacar: Normal, Log-normal, Exponencial, Gama e Weibull. Algumas serão abordadas a seguir.

3.4.4 Distribuição Gama

A distribuição Gama é composta por uma família de distribuições. A distribuição Gama pode ser tratada como “uma generalização da distribuição exponencial.” (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009, p. 31).

A função densidade de probabilidade Gama é dada pela equação (3.6).

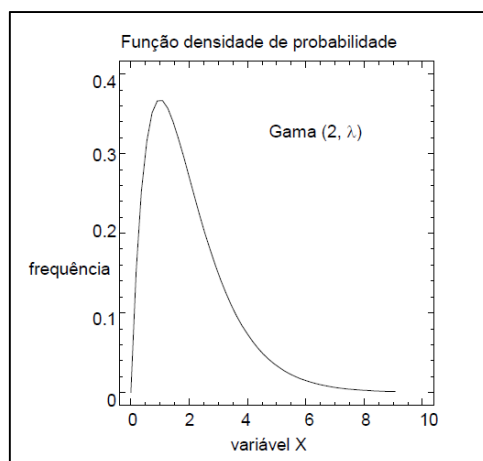
$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t} \quad (3.6)$$

Onde:

- γ – parâmetro de forma;
- λ – parâmetro de escala.

A Figura 3.4 apresenta o gráfico da função densidade de probabilidade da Gama.

Figura 3.4 - Função Densidade de Probabilidade Gama



Fonte: WERNER (1996)

A distribuição gama é um modelo de distribuição de vida flexível que pode oferecer um bom ajuste para alguns conjuntos de dados de falha. No entanto, não é amplamente utilizado como modelo de distribuição de vida para mecanismos comuns de falha (Reliawiki,2019).

3.4.5 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull é “apropriada na modelagem de tempos até falha apresentando funções de risco constante, estritamente crescente e estritamente decrescente.” (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009, p. 29). Ela possui uma importante vantagem em relação à outras distribuições: com apenas parâmetros (forma e escala) pode modelar uma infinidade de distribuições de dados (GNEDENKO, PAVLOV e USHAKOV, 1999, p. 14, tradução nossa).

A função densidade de probabilidade Weibull com dois parâmetros é dada pela equação:

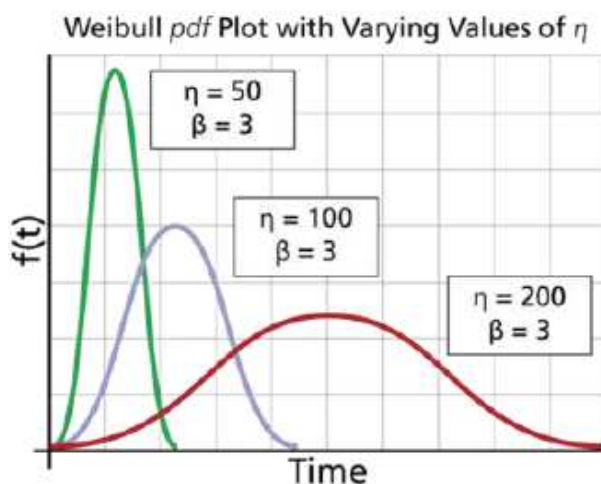
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.7)$$

Onde:

- β – parâmetro de forma;
- η – parâmetro de escala.

A Figura 3.5 apresenta a função densidade de probabilidade Weibull.

Figura 3.5 - Função Densidade de Probabilidade Weibull



Fonte: Reliawiki (2019)

A distribuição Weibull é uma das funções mais utilizadas nos estudos de engenharia.

3.5 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS REPARÁVEIS

Conceitos e medidas de confiabilidade podem ser aplicados também para sistemas reparáveis. Algumas medidas para sistema reparáveis são apresentadas a seguir.

3.5.1 Tempo Médio Entre Falhas – MTBF

O tempo médio entre falhas (MTBF) (do Inglês *Mean Time Between Failure*) é uma medida de confiabilidade utilizada para calcular o tempo entre falhas de sistemas reparáveis (SMITH, 2011, p. 16, tradução nossa).

O MTBF pode ser calculado dividindo-se o tempo disponível de funcionamento do equipamento pelo número de falhas (BARAN, 2015, p. 28).

3.5.2 Tempo Médio de Reparo – MTTR

O tempo médio até o reparo (MTTR) (do Inglês *Mean Time to Repair*) é uma medida de confiabilidade usada para representar o tempo médio necessário para realizar o reparo em um equipamento após a ocorrência de uma falha. No cálculo do MTTR os tempos de setup e ajustes de produção são desconsiderados. (BARAN, 2015, p. 29).

3.5.3 Disponibilidade

A disponibilidade (A) (do Inglês *Availability*), segundo Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 160) é a “[...] capacidade de um item, mediante manutenção apropriada, desempenhar sua função requerida em um determinado instante do tempo ou em um período de tempo predeterminado”.

A disponibilidade é dada pela equação (3.8).

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3.8)$$

A disponibilidade pode ser classificada em alguns tipos, como por exemplo, a disponibilidade instantânea e a disponibilidade média.

Na disponibilidade instantânea, $A(T=t)$, o valor de disponibilidade é calculado para um determinado instante de tempo t .

A disponibilidade instantânea pode ser calculada utilizando a equação (3.9)

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u)m(u)du \quad (3.9)$$

Na disponibilidade média, $\overline{A(T)}$, o valor de disponibilidade é calculado para um determinado período de tempo.

A disponibilidade média pode ser calculada utilizando a equação (3.10).

$$\overline{A(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T A(t)dt \quad (3.10)$$

Como apresentado anteriormente existem diversas equações para se calcular as medidas de confiabilidade. Realizar estes cálculos manualmente, embora possível, é inviável devido à grande quantidade de cálculos necessários. Por isso, são utilizados softwares para facilitar o trabalho e tornar os cálculos mais precisos e rápidos.

3.6 DIAGRAMA DE BLOCOS

O diagrama de blocos é uma ferramenta da engenharia de confiabilidade que ajuda a identificar quais componentes do sistema sob análise são necessários para o cumprimento da função requerida e quais podem falhar sem afetá-lo (Biolini, 2007).

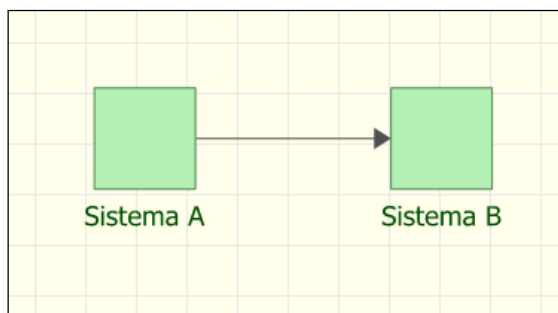
No diagrama de blocos, cada bloco pode representar um sistema, um subsistema ou um componente. Os blocos são ligados entre si seguindo um arranjo lógico representando o sistema em questão (Reliasoft, 2019). As configurações mais usuais são:

- Configuração Série;
- Configuração Paralela Simples;
- Configuração Paralela k de N.

3.6.1 Configuração Série

Na configuração série os blocos estão ligados de forma que se um falhar, o sistema todo falha. A Figura 3.6 apresenta um diagrama de blocos em série.

Figura 3.6 - Configuração Série



Fonte: O autor (2019).

A equação para cálculo da confiabilidade de um sistema em série é apresentada na equação (3.11).

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_n \quad (3.11)$$

Onde:

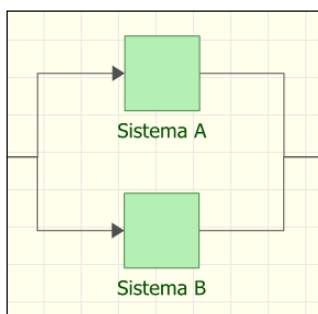
R_s é a confiabilidade do sistema

R_n é a confiabilidade dos "n" componentes do sistema

3.6.2 Configuração Paralela Simples

Na configuração Paralela Simples os blocos estão ligados de forma que se um falhar, o sistema continua operando. Esta configuração também é conhecida com redundância. A Figura 3.7 apresenta um diagrama de blocos em Paralelo.

Figura 3.7 - Configuração Paralela Simples



Fonte: o autor (2019).

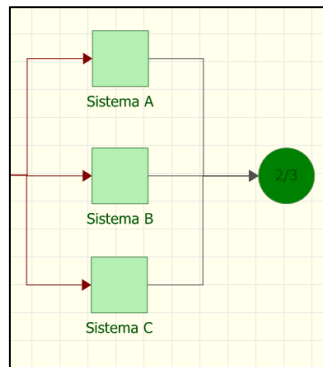
A equação para cálculo da confiabilidade de um sistema em paralelo é apresentada na equação (3.12).

$$R_s = 1 - [(1 - R_1) \times (1 - R_2) \times (1 - R_n)] \quad (3.12)$$

3.6.3 Configuração Paralela k de N

Uma variação da configuração paralela é a configuração k de N, conforme apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Configuração Sistema k de N



Fonte: o autor (2019).

Nesta configuração o sistema necessita de dois componentes funcionando para continuar a funcionar.

A equação para cálculo da confiabilidade de um sistema em paralelo é apresentada na equação (3.13)

$$R_s = R^n + nR^{n-1}(1 - R) + \frac{n(n-1) \times R^{n-2} \times (1 - R)^2}{2!} + \frac{n(n-1) \dots (n-k+1)R^{2-k}(1 - R)^k}{k!} \quad (3.13)$$

Após conhecido e preparado o arranjo físico do sistema é necessário conhecer os valores de confiabilidade do sistema.

3.7 ANÁLISE RAM

A análise RAM pode ser definida como um conjunto de técnicas de engenharia que tem por objetivo aperfeiçoar as estratégias de manutenção de equipamentos ou sistemas (SMITH, 2011).

Conforme Calixto e Bretas (2008) o objetivo da Análise RAM é avaliar o desempenho de um equipamento ou sistema através da definição e melhoria dos equipamentos críticos, para que o sistema atinja a disponibilidade necessária. E o primeiro passo para realização da Análise RAM é realizar o levantamento dos modos de falha dos equipamentos, que causam perda para o sistema estudado, o histórico de falhas e o tempo necessário para reparar cada modo de falha. Assim sendo um banco de dados confiável e completo é indispensável para realização desta análise.

No capítulo quatro as ferramentas vistas anteriormente serão aplicadas e a confiabilidade do sistema será determinada com base nas informações do banco de dados de falhas do sistema.

4 DESENVOLVIMENTO

Nos próximos parágrafos serão detalhadas as etapas do desenvolvimento do trabalho, iniciando pelo tratamento da base de dados.

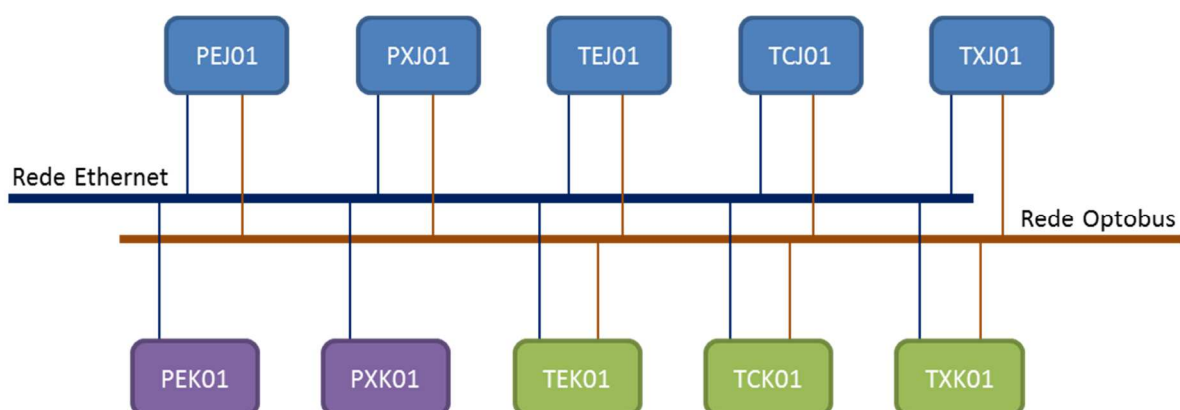
4.1 DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

O sistema estudo neste trabalho trata-se de um sistema reparável é composto de diversos equipamentos com seus próprios resultados de confiabilidade e manutenibilidade. Para facilitar a compreensão e estudo, o sistema será dividido em subsistemas de acordo com a similaridade de funções dentro da arquitetura do sistema.

4.1.1 Diagrama de blocos do Sistema

A Figura 4.1 mostra a arquitetura simplificada do sistema de automação da linha de Decapagem e Laminação. Na parte superior da figura estão os controladores principais e na parte inferior estão os controladores auxiliares.

Figura 4.1 – Arquitetura simplificada do sistema de automação

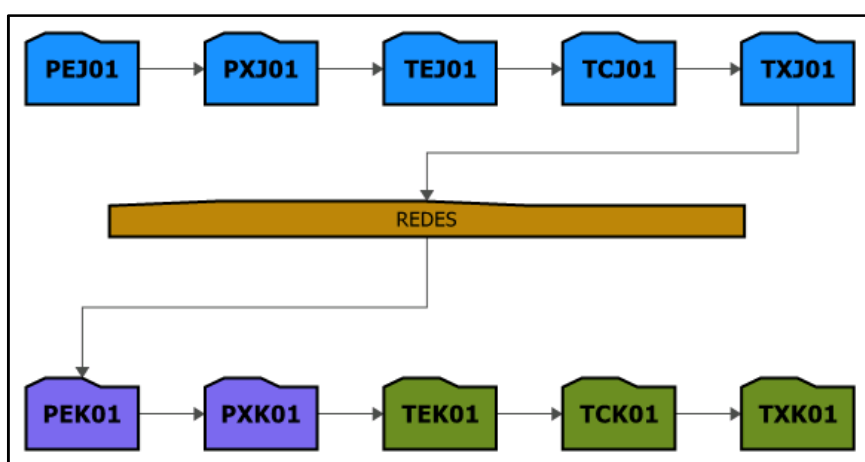


Fonte: O autor (2019)

Cada controlador é responsável por certa região da linha de produção e tem papel fundamental para o seu funcionamento. Falhas em qual quer controlador causa parada imediata na linha da produção. Existem duas redes principais que conectam

os controladores, permitindo troca de dados entre e sincronismo de equipamentos controlados por diferentes controladores. Falhas nos componentes das redes de comunicação causam parada imediata na linha de produção. Considerando esta arquitetura, onde qualquer equipamento neste nível causa parada na linha de produção, foi definido o diagrama de blocos em série, como mostra a Figura 4.2. Cada bloco representa um subsistema que possui seu próprio diagrama de blocos como será mostrado a seguir.

Figura 4.2 – Diagrama de blocos do sistema



Fonte: O autor (2019)

4.1.2 Diagrama de blocos dos controladores Principais

Os controladores principais são responsáveis pelos equipamentos mais importantes da linha de produção. Recebem e processam informações das bobinas na entrada e saída da linha, controlam velocidade e tensão da tira de aço através de comando para inversores de frequência, operam malhas de controle complexas, gerenciam as redes de comunicação, entre outras funções.

Cada controlador é composto por um rack que recebe a CPU principal e outras placas de interface para conexão e controle de equipamentos externos. Além da conexão direta no rack que está localizado em uma sala elétrica, o controlador conta com uma rede de painéis remotos localizados próximos dos equipamentos controladores por ele. Esta rede se conecta a uma das placas do rack.

Os cinco controladores principais utilizam o mesmo modelo de rack, que possui fonte de alimentação e slots para receber as placas de cada controlador. O mesmo modelo de CPU também é utilizado. Responsável por receber e executar o programa de controle, ela é a principal placa do controlador. Faz a leitura e comando nas placas de interface através do barramento de slots do rack.

As placas de interface aplicadas podem variar de acordo com a aplicação de cada controlador. Elas estão listadas abaixo e aparecem no diagrama de blocos de acordo com a utilização de cada controlador.

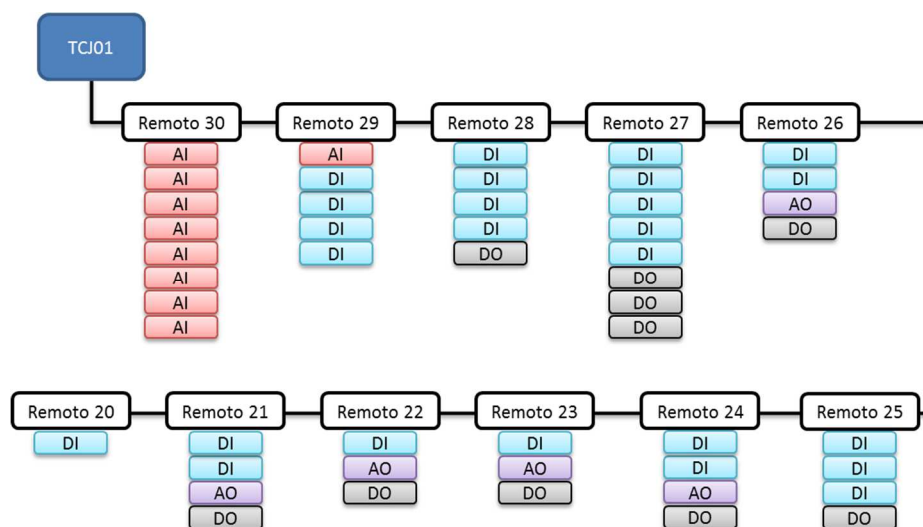
- ICV196 – Cartão de entradas e saídas digitais
- ICV150 – Cartão de entradas analógicas
- MI16AO – Cartão de saídas analógicas
- DIZ232 – Cartão de leitura de encoder incremental
- SSI232 – Cartão de leitura de encoder absoluto
- VLIO – cartão de rede OPTOBUS
- PFB – Cartão de rede Profibus
- GEN100 – Cartão de rede de painéis remotos

A rede de painéis remotos desses controladores possui 5 tipos de cartões eletrônicos, além de cabos, bases e resistores de casamento de impedância. Para este estudo estão sendo considerados somente os cartões eletrônicos, visto que os outros itens não apresentaram falhas no período de análise. Neste trabalho, os cinco modelos de cartões eletrônicos serão identificados como:

- Remoto – Cartão principal para comunicação com o controlador
- DI – Cartão de entradas digitais
- DO – Cartão de saídas digitais
- AI – Cartão de entradas analógicas
- AO – Cartão de saídas analógicas

A Figura 4.3 mostra a rede de comunicação do controlador TCJ01 de forma simplificada. Neste controlador são utilizados os cinco tipos de cartões da rede.

Figura 4.3 - Rede de painéis remotos TCJ01



Fonte: O autor (2019)

Todos os controladores do estudo utilizam a mesma topologia de rede de painéis remotos, inclusive os controladores auxiliares. O levantamento de utilização dos cartões por controlador é mostrado na Tabela 4.1. Essas informações serão utilizadas para a criação dos diagramas de blocos dos controladores.

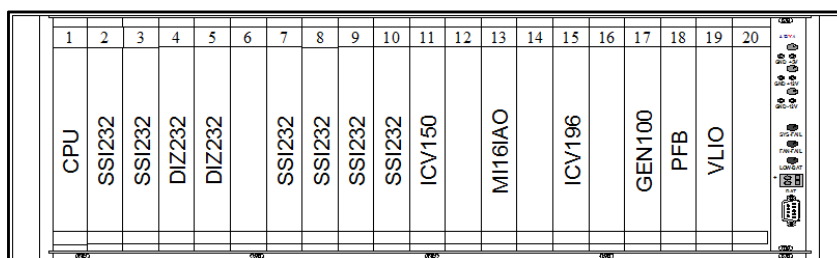
Tabela 4.1 - Utilização de cartões remotos nos controladores

CONTROLADOR	REMOTO	DI	DO	AI	AO	TOTAL
PEK01	14	65	20	4	8	111
PXK01	8	34	9	0	4	55
PEJ01	10	37	15	6	6	74
PXJ01	4	13	6	2	0	25
TEK01	17	61	27	0	8	113
TCK01	16	48	14	3	4	85
TXK01	20	83	32	1	3	139
TEJ01	5	10	4	0	4	23
TCJ01	11	25	10	9	5	60
TXJ01	5	10	4	0	4	23
TOTAL	110	386	141	25	46	711

Fonte: O autor (2019)

Como parte do sistema de automação, cada controlador foi considerado um subsistema com seu próprio diagrama de blocos. A Figura 4.4 mostra o rack do controlador PEJ01, bem como todos os cartões eletrônicos utilizados neste controlador.

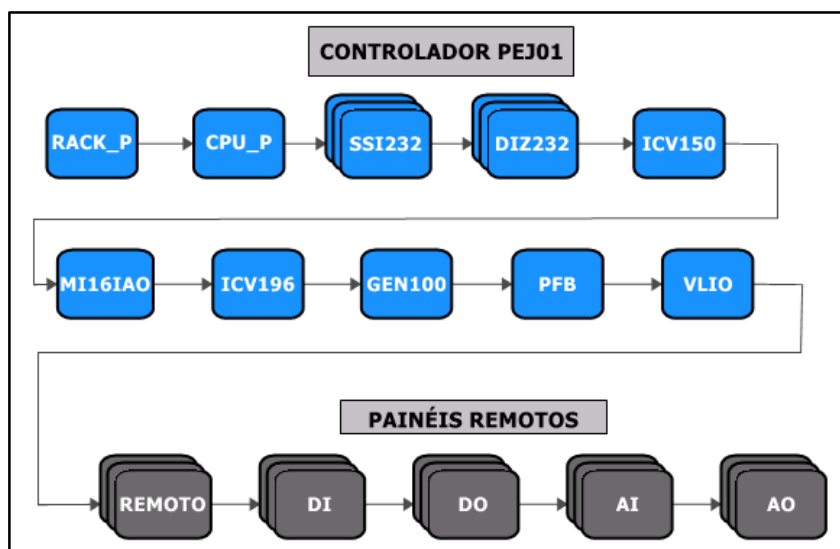
Figura 4.4 – Rack do controlador PEJ01



Fonte: O autor (2019)

Através dos dados de análise de vida de cada componente do controlador foi criado o diagrama de blocos como mostra a Figura 4.5. Além dos componentes do rack, foram inseridos os componentes da rede de painéis remotos deste controlador.

Figura 4.5 - Diagrama de blocos do controlador PEJ01

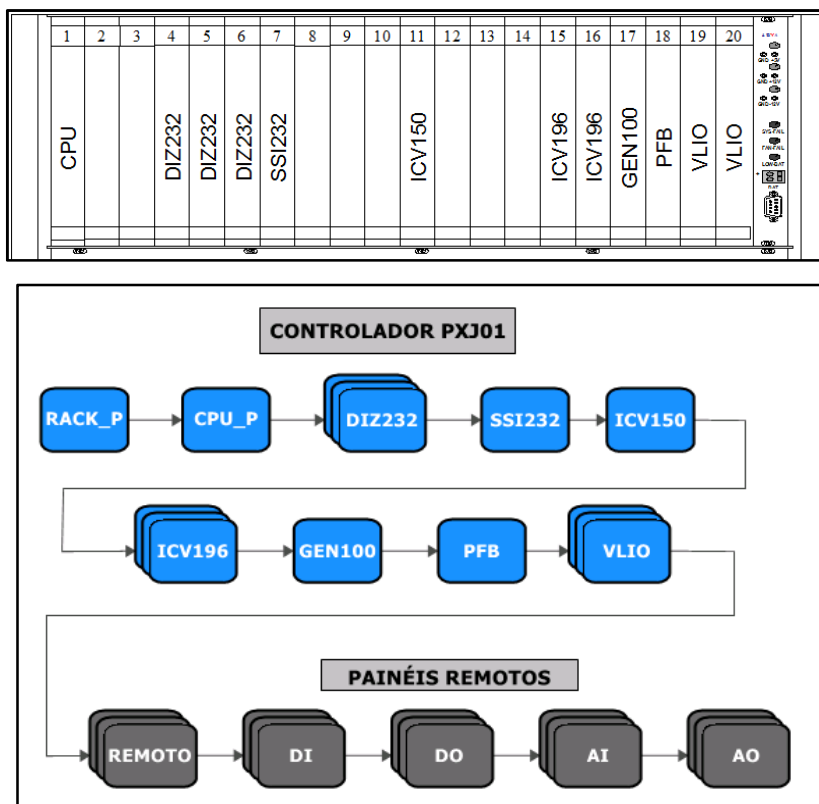


Fonte: O autor (2019)

Seguindo o método utilizado para o controlador PEJ01, as Figuras Figura 4.6 a Figura 4.9 mostram as configuração de rack e os diagramas de blocos desenvolvidos para cada controlador. Apesar de não aparecer nas figuras, os componentes de painéis remotos também são considerados nas simulações dos diagramas de blocos.

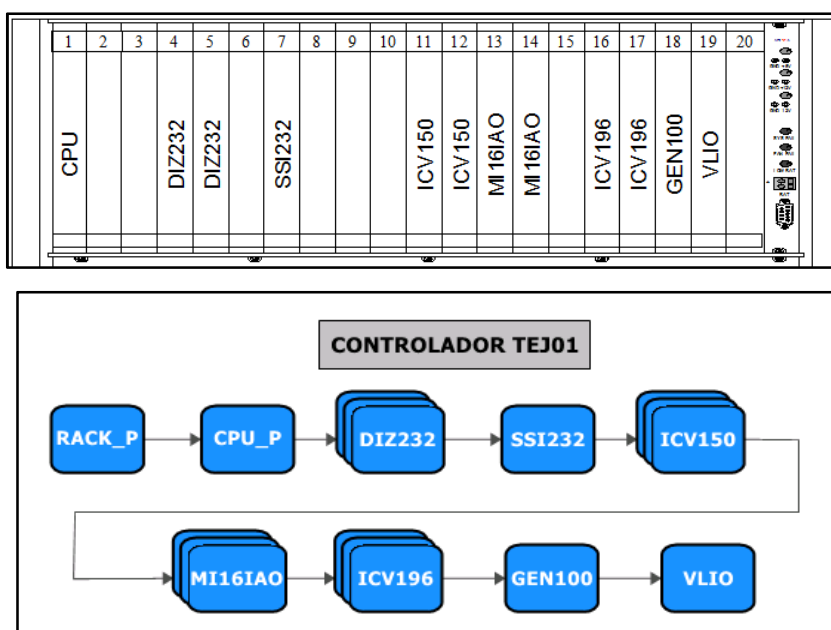
Números e modelos dos cartões eletrônicos dos painéis remotos foram extraídos da Tabela 4.1

Figura 4.6 - Rack e diagrama de blocos do controlador PXJ01



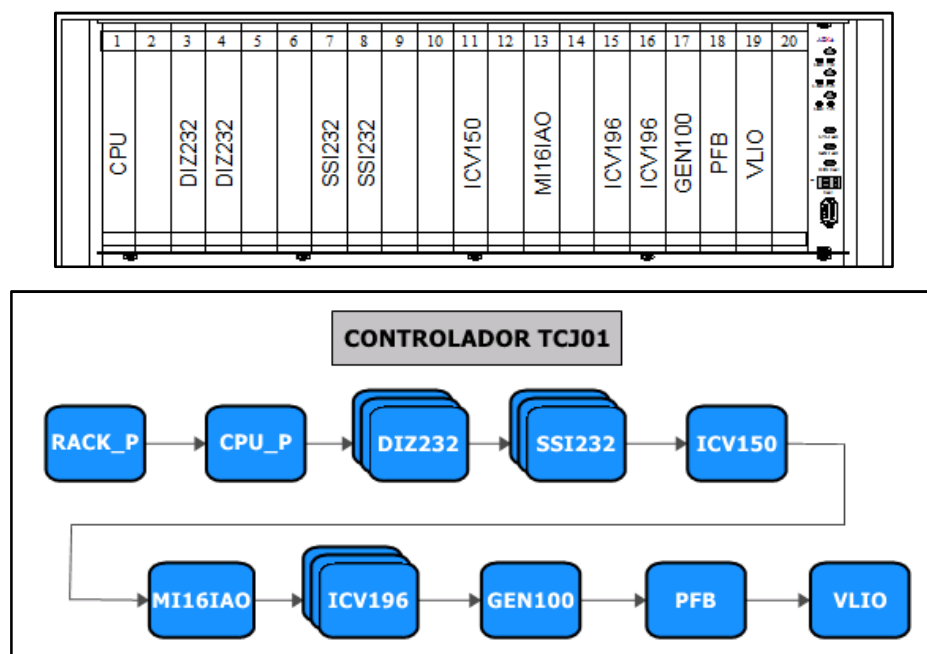
Fonte: O autor (2019)

Figura 4.7 - Rack e diagrama de blocos do controlador TEJ01



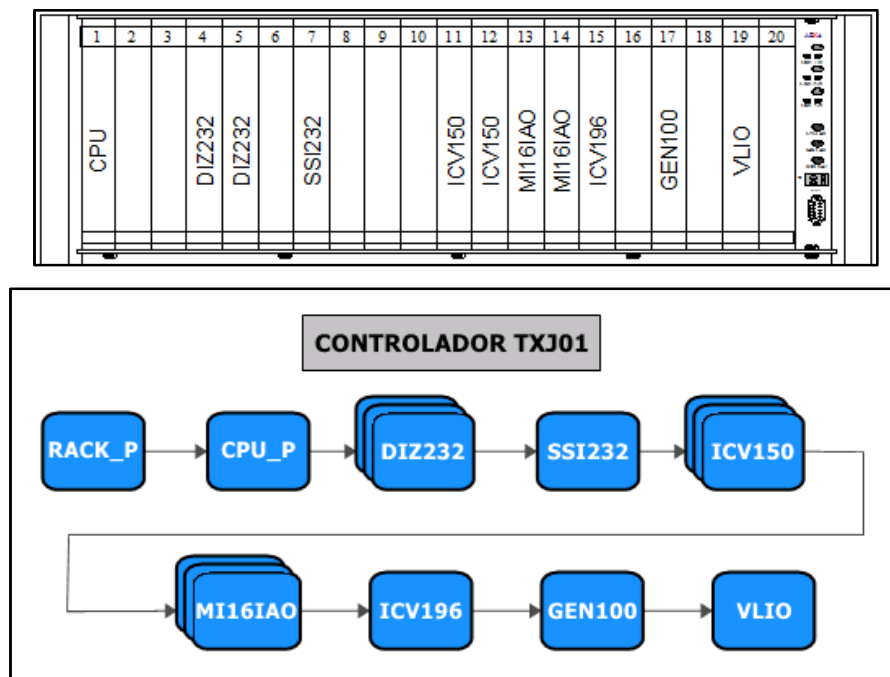
Fonte: O autor (2019)

Figura 4.8 - Rack e diagrama de blocos do controlador TCJ01



Fonte: O autor (2019)

Figura 4.9 - Rack e diagrama de blocos do controlador TXJ01



Fonte: O autor (2019)

Tratando os controladores como subsistemas e, conseqüentemente blocos que compõem o diagrama principal, torna possível a simulação individual de cada

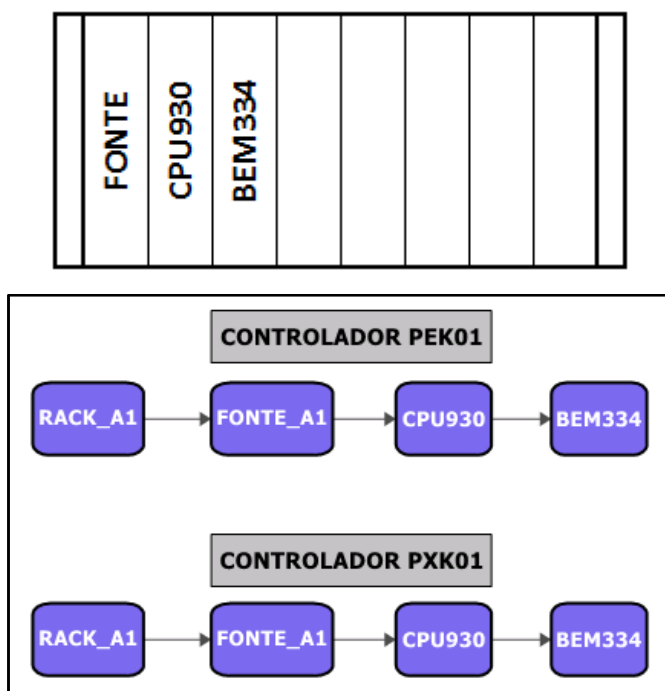
controlador, bem como a comparação das grandezas de confiabilidade entre os controladores que compõem o sistema.

4.1.3 Diagrama de blocos dos controladores Auxiliares

Os controladores auxiliares são responsáveis por equipamentos auxiliares com complementam as funções dos equipamentos principais. Atuam principalmente nas entradas e saídas das linhas de produção, e controlam diversas sequências automáticas com sincronismo entre os equipamentos. Para isso, esses controladores são compostos por rack, fonte, CPU e placas de comunicação de redes. Os controladores auxiliares estudados neste trabalho não possuem cartões de interface de entradas e saídas diretamente no rack. Mas possuem rede de painéis remotos assim como os controladores principais, inclusive utilizando os mesmos modelos de cartões como mostrado na Tabela 4.1.

Os controladores PEK01 e P XK01 tem a mesma configuração de rack, mostrada na Figura 4.10.

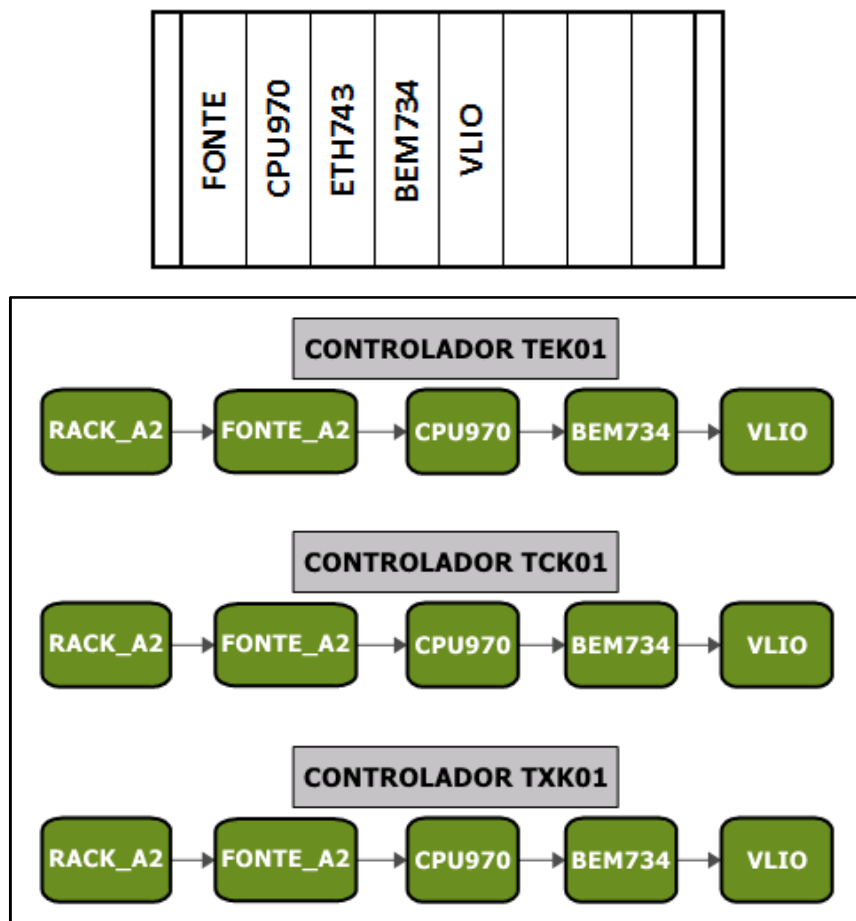
Figura 4.10 - Configuração de rack dos controladores PEK01 e P XK01



Fonte: O autor (2019)

Já os controladores TEK01, TCK01 e TXK01 tem a mesma configuração de rack, mostrada na Figura 4.11. Esses três controladores possuem cartões diferentes dos controladores citados anteriormente. Além disso, possui placa VLIO para comunicação na rede OPTOBUS assim como os controladores principais.

Figura 4.11 - Configuração de rack dos controladores TEK01, TCK01 e TXK01



Fonte: O autor (2019)

4.1.4 Diagrama de blocos das redes de comunicação

Além das redes de painéis remotos tratados em cada controlador, existem duas redes de comunicação entre os controladores que transmitem dados importantes para o bom funcionamento do sistema de automação. Estas redes conectam também a rede de controladores com outros equipamentos das linhas de produção como inversores de frequência, supervisório e sistema de banco de dados.

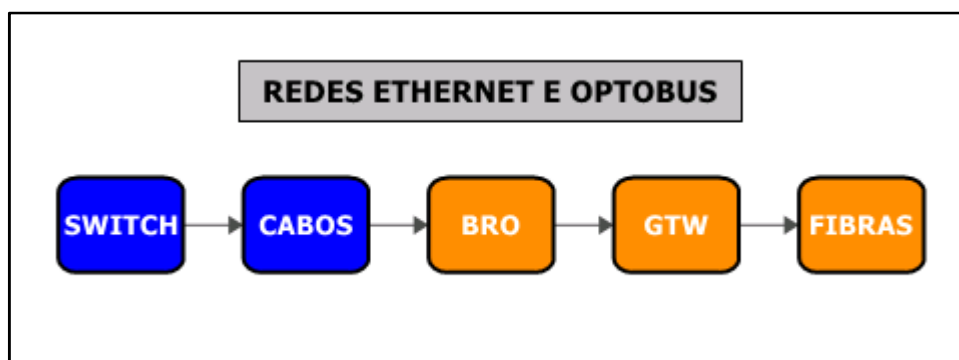
A rede ethernet agrega alguns protocolos para comunicação entre os controladores e com outros sistemas, tais como TCP/IP, EGD, ModBus e OPC. Além

das placas de comunicação localizadas nos controladores, a rede conta com switches e cabos de rede.

A rede OPTOBUS é uma rede de comunicação por cabos de fibra ótica que transmite informações entre alguns controladores e com sistemas de acionamentos. Ela é composta pelas placas VLIO, já citada nos controladores, por hubs de fibra ótica (BRO), por computadores industriais com função de gateway para rede CAN e por fibras óticas para comunicação entre os componentes de rede.

Considerando as definições apresentadas, foi criado um diagrama de blocos composto pelas duas redes de comunicação como mostra a Figura 4.12.

Figura 4.12 - Diagrama de blocos das redes de comunicação



Fonte: O autor (2019)

Como pode ser observado, a configuração deste subsistema é série, pois tanto na rede Ethernet quanto na rede OPTOBUS, falha em qualquer componente causa parada na linha de produção.

4.2 BASE DE DADOS E MODELAMENTO DO SISTEMA

O sistema de automação foi instalado junto à montagem da empresa em 2003. Naquela época algumas linhas de produção utilizaram a mesma estrutura de automação com os mesmos equipamentos. Para a análise de dados de vida de cada componente será considerada a quantidade todas de peças instaladas em condições semelhantes em todas as linhas de produção. Falhas nos primeiros meses de operação foram descartadas por se tratar de falhas de comissionamento e montagem do sistema. As principais fontes de dados de falha utilizadas são o registros de retirada

de peças no almoxarifado para substituição no equipamento e o banco de dados de eventos de paradas nas linhas de produção.

Através da base de dados foram calculadas as medidas de confiabilidade de cada equipamento. Para isso foi utilizado o software Weibull ++, que possui assistente de distribuição que auxilia na escolha da distribuição de vida que melhor se adere aos dados disponíveis. Assim foi possível obter a pdf de cada equipamento, como mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Modelos de Confiabilidade dos componentes do sistema

Nome do Modelo	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3
RACK_P_Modelo	2P-Weibull	3,035	345,599	N/D
CPU_P_Modelo	Gama	4,712	2,573	N/D
CPU930_Modelo	2P-Exponencial	695,143	24,466	N/D
CPU970_Modelo	2P-Exponencial	193,098	36,692	N/D
REMOTO_Modelo	Lognormal	8,483	2,070	N/D
DO_Modelo	Gama Generalizada	4,071	2,106	-9,725
AO_Modelo	Gama Generalizada	4,065	2,058	-6,267
CABOS_Modelo	Confiabilidade Pontual	1,000	0,000	N/D
GTW_Modelo	Gama Generalizada	2,867	2,180	-5,685
SSI232_Modelo	Gama Generalizada	6,273	0,201	5,120
RACK_A1_Modelo	Gama Generalizada	4,696	0,063	-50
ICV196_Modelo	Lognormal	8,638	2,604	N/D
ICV150_Modelo	2P-Exponencial	378,158	27,240	N/D
MI16IAO_Modelo	Confiabilidade Pontual	1,000	0,000	N/D
DIZ232_Modelo	3P-Weibull	0,557	1688,000	19,577
PFB_Modelo	2P-Exponencial	346,808	20,000	N/D
VLIO_Modelo	2P-Weibull	0,926	708,967	N/D
GEN100_Modelo	2P-Exponencial	360,329	88,484	N/D
FONTE_A1_Modelo	2P-Exponencial	1116,054	29,216	N/D
BEM334_Modelo	Lognormal	8,549	3,563	N/D
RACK_A2_Modelo	Confiabilidade Pontual	1,000	0,000	N/D
FONTE_A2_Modelo	2P-Exponencial	370,540	57,193	N/D
BEM734_Modelo	Confiabilidade Pontual	1,000	0,000	N/D
DI_Modelo	Gama	9,317	0,744	N/D
AI_Modelo	3P-Weibull	0,639	529,277	43,257
SWITCH_Modelo	Confiabilidade Pontual	1,000	0,000	N/D
BRO_Modelo	2P-Exponencial	483,333	18,000	N/D
FIBRAS_Modelo	Gumbel	466,173	68,800	N/D

Fonte: O autor (2019)

Diversas distribuições foram aplicadas em função dos dados de falha de cada componente do sistema. Alguns equipamentos não possuem dados de vida pois estão

deste a início de funcionamento sem apresentar qualquer problema. Na tabela acima eles aparecem como se não pudessem falhar (Confiabilidade Pontual = 1). Em trabalhos futuros serão consultados os fabricantes desses equipamentos a fim de obter informações possam ajudar a definir a melhor distribuição de vida.

Para o modelamento da mantenebilidade do sistema, foi considerado o tempo desde a parada do equipamento na hora da falha até seu retorno ao funcionamento. Foram verificados os tempos médios para intervenções ocorridas no passado e estimadas o tempo de parada de linha considerando as condições atuais de conhecimento da equipe, capacidade de diagnóstico, peças sobressalentes, etc. A Tabela 4.3 mostra os modelos de manutenção corretiva utilizados neste trabalho. A distribuição normal foi utilizada para o modelamento.

Tabela 4.3 - Modelos de manutenção corretiva

Nome do Modelo	Distribuição	Unidade	Parâmetro 1	Parâmetro 2
MC_RACK_P_tempo	Normal	Hora (h)	3,70	0,2
MC_CPU_P_Tempo	Normal	Hora (h)	3,50	0,6
MC_ICV196_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_ICV150_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_MI16IAO_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_DIZ232_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_SSI232_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_PFB_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_VLIO_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_GEN100_Tempo	Normal	Hora (h)	2,10	0,2
MC_RACK_A1_tempo	Normal	Hora (h)	3,00	0,3
MC_FONTE_A1_Tempo	Normal	Hora (h)	2,00	0,1
MC_CPU930_Tempo	Normal	Hora (h)	2,50	0,2
MC_BEM334_Tempo	Normal	Hora (h)	2,50	0,5
MC_RACK_A2_Tempo	Normal	Hora (h)	2,80	0,3
MC_FONTE_A2_Tempo	Normal	Hora (h)	2,00	0,1
MC_CPU970_Tempo	Normal	Hora (h)	2,50	0,3
MC_BEM734_Tempo	Normal	Hora (h)	2,50	0,2
MC_REMOTO_Tempo	Normal	Hora (h)	3,00	0,4
MC_DI_Tempo	Normal	Hora (h)	1,50	0,1
MC_DO_Tempo	Normal	Hora (h)	1,50	0,1
MC_AI_Tempo	Normal	Hora (h)	1,50	0,1
MC_AO_Tempo	Normal	Hora (h)	1,50	0,1
MC_BRO_Tempo	Normal	Hora (h)	4,00	0,5
MC_GTW_Tempo	Normal	Hora (h)	2,00	0,3
MC_FIBRAS_Tempo	Normal	Hora (h)	2,00	0,2

MC_SWITCH_Tempo	Normal	Hora (h)	3,00	0,1
MC_CABOS_Tempo	Normal	Hora (h)	6,00	0,5

Fonte: O autor (2019)

Neste estudo o sistema é composto por 813 componentes de 28 modelos distintos. Alguns são de fácil substituição, outros requerem desmontagem complexa e carregamento de configurações. Além disso, alguns equipamentos possuem autodiagnostico que facilitam a identificação de falha, enquanto outros demandam grande tempo de análise até a definição do componente em falha. Estas condições justificam a diferença entre os parâmetros dos modelos de manutenibilidade.

4.3 SIMULAÇÃO

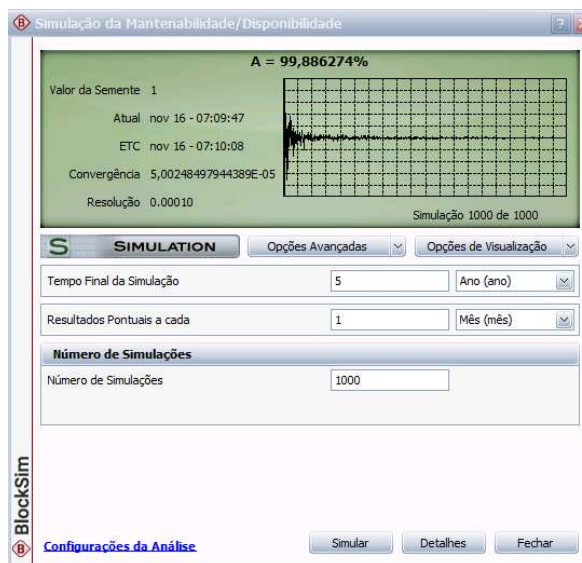
Os modelos de confiabilidade e manutenibilidade de cada equipamento foram aplicados em cada componente do sistema de acordo com o diagrama de blocos mostrados anteriormente para permitir a simulação, que foi realizada no *BlockSim*.

Além dos modelos de confiabilidade e manutenibilidade, foi inserida a idade de cada componente do sistema. Alguns equipamentos nunca foram substituídos e a idade total do sistema foi considerado para esses, 193 meses. Para componentes substituídos ao longo do tempo, a idade atual foi determinada e utilizada na simulação. Isso permitiu simular o sistema na condição atual, em que com cada componente tem um tempo de vida específico, com sua respectiva probabilidade de falha.

Na simulação, tempos de falha aleatórios da distribuição de falhas de cada componente são gerados. Esses tempos de falha são combinados de acordo com a maneira como os componentes são organizados em termos de confiabilidade no sistema. Os resultados gerais são analisados para determinar o comportamento de todo o sistema.

Os parâmetros da simulação são apresentados na Figura 4.13. Foi realizada simulação para cinco anos de funcionamento do sistema com resultados pontuais a cada mês.

Figura 4.13 - Simulação do sistema no *BlockSim*



Fonte: O autor (2019)

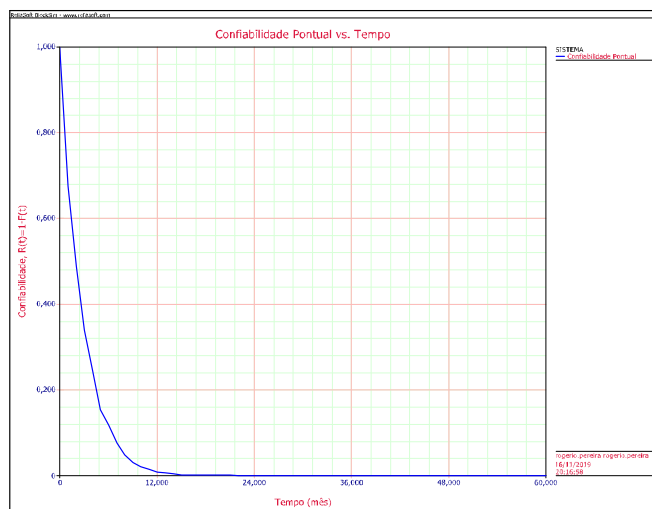
Para melhor exibição da convergência foi utilizada resolução de 0,00010. Mil simulações foram realizadas e demonstram bom resultado de convergência.

4.4 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA

A Figura 4.14 mostra a confiabilidade do sistema para os próximos cinco anos de operação. Pode-se observar que a confiabilidade a confiabilidade no tempo 12 meses é de aproximadamente 1%. Isto significa que existe 99% de chance de o sistema falhar até 12 meses de operação. Isto se dá possivelmente devido à queda de confiabilidade de cada componente com o passar do tempo.

O sistema é composto basicamente por componentes eletrônicos, que normalmente são modelados considerando falha aleatória. Nesse caso é possível constatar que mesmo peças eletrônicas estão propensas a aumentar a taxa de falhas com o tempo. Isto se dá principalmente pela presença de capacitores e alguns semicondutores utilizados nos circuitos, que podem ter suas características de funcionamento degradadas com o passar do tempo de acordo com a aplicação.

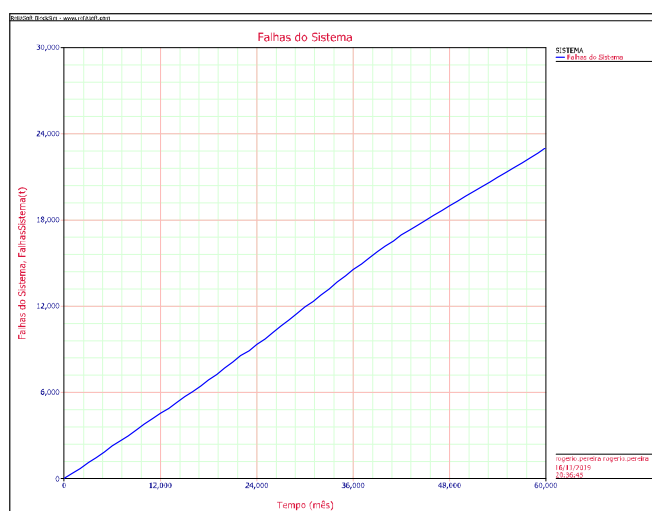
Figura 4.14 - Confiabilidade Pontual do sistema



Fonte: O autor (2019)

Através da simulação é possível estimar a ocorrência de falhas no sistema, como pode ser observado na Figura 4.15. Nos próximos cinco anos são esperadas vinte e três falhas no sistema. O gráfico mostra um comportamento quase linear, com quatro ou cinco falhas por ano.

Figura 4.15 - Falhas no sistema



Fonte: O autor (2019)

Para identificar os principais responsáveis pelas falhas no sistema, o relatório de simulação traz o índice RS FCI (*ReliaSoft's Failure Criticality Index*). Este é um

índice relativo que mostra a porcentagem de vezes que uma falha deste componente causou uma falha no sistema. Ele é calculado para cada componente do sistema e está apresentado na Tabela 4.4 agrupado por modelo de componente para simplificar a análise do sistema neste trabalho.

Tabela 4.4 - FCI por modelo de componentes do sistema

MODELO COMPONENTE	QUANTIDADE INSTALADA	FALHAS ESPERADAS	RS FCI TOTAL	RS FCI MÉDIO
DI	386	4,758	20,79%	0,05%
GEN100	5	3,045	13,22%	2,64%
AI	25	2,481	10,75%	0,43%
REMOTO	110	2,106	9,21%	0,08%
DO	141	1,846	8,04%	0,06%
SSI232	11	1,538	6,68%	0,61%
ICV150	7	1,04	4,51%	0,64%
AO	46	0,995	4,33%	0,09%
RACK_P	5	0,969	4,21%	0,84%
VLIO	9	0,817	3,54%	0,39%
DIZ232	11	0,683	2,98%	0,27%
CPU_P	5	0,654	2,85%	0,57%
GTW	8	0,483	2,10%	0,26%
FONTE_A2	3	0,369	1,60%	0,53%
BRO	4	0,339	1,46%	0,37%
CPU930	2	0,175	0,76%	0,38%
CPU970	3	0,171	0,75%	0,25%
RACK_A1	2	0,168	0,73%	0,37%
ICV196	8	0,157	0,68%	0,09%
FONTE_A1	2	0,102	0,44%	0,22%
PFB	3	0,081	0,35%	0,12%
BEM334	2	0,059	0,26%	0,13%
FIBRAS	1	0,003	0,01%	0,01%
TOTAL	799	23,039	100%	

Fonte: O autor (2019)

O resultado aponta o componente DI como principal causador de falhas no sistema nos próximos cinco anos. Com aproximadamente cinco falhas, é responsável por 20,8 % das falhas esperadas no sistema durante o período. Além do componente DI, os principais responsáveis por falhas são GEN100, AI, REMOTO e DO, consecutivamente.

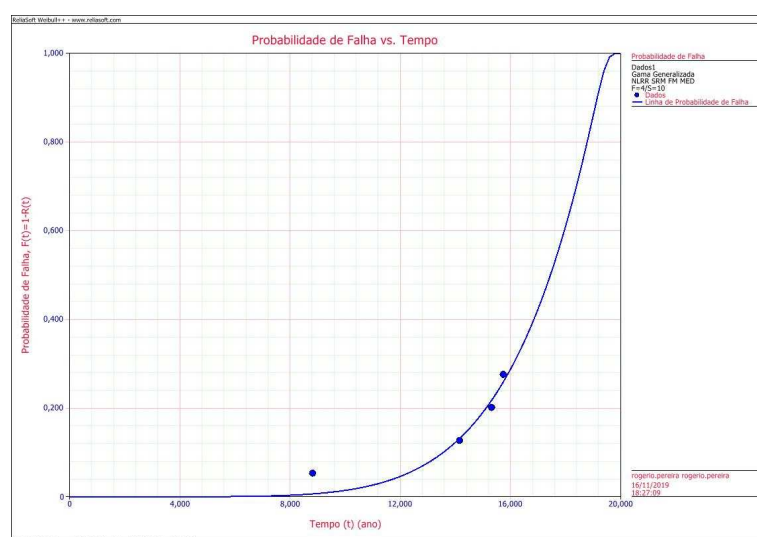
A Tabela 4.4 mostra também a quantidade instalada e o FCI médio para cada modelo utilizado no sistema. Estas informações possibilitam relacionar o FCI com o

número de componentes utilizados e com sua respectiva situação de confiabilidade no período.

Entre os cinco primeiros responsáveis por falhas no sistema, pode-se observar que quatro deles tem grande quantidade instala, o que tem impacto direto na FCI total. O primeiro da lista por exemplo, DI, cada peça instalada apresenta probabilidade de falha, em média, de 0,5%. Mas como existem 386 peças instaladas, o FCI total chega a 20,79%. Situação semelhante pode ser observada para os componentes AI, REMOTO e DO.

Por outro lado, GEN100, que possui somente cinco peças instaladas possui o segundo maior impacto nas falhas do sistema, com 13,22%. Esta situação pode ser explicada pela confiabilidade atual desses componentes como mostra a Figura 4.16.

Figura 4.16 - Probabilidade de falha da placa GEN100



Fonte: O autor (2019)

A análise de dados de vida da placa GEN100 contou com informações de quatorze placas funcionando em situação semelhante no período de 15,5 anos. A distribuição que melhor se aderiu aos dados foi a Gama generalizada. Como pode ser observado, três falhas ocorreram entre 14 e 15,5 anos, e assim probabilidade de falha cresce consideravelmente agora, quando o sistema tem 16 anos de funcionamento. Outra informação importante é que, das quatro falhas registras, duas são do sistema sob estudo, ou seja, os três componentes previstos para falhar nos próximos cinco anos são exatamente as três placas que ainda não falharam neste sistema.

O sistema é composto basicamente por placas eletrônicas. Testes após falhas mostraram grande dificuldade ou nenhuma chance de reparo para a maioria dos componentes. A possibilidade de manutenção preventiva para prolongamento da vida foi identificada somente no rack do controlador principal, que possui fonte interna e nas fontes de controladores auxiliares. As fontes possuem componentes passíveis de substituição que apresentam degradação ao longo do tempo, com capacitores e ventiladores.

4.5 ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE

O sistema sob estudo faz parte de uma linha de produção que opera 24 horas por dia, onde qualquer parada de produção gera prejuízo ao negócio. O índice de disponibilidade é um indicador acompanhado constantemente de modo a garantir os resultados esperados. Por isso, além da análise de confiabilidade do sistema, neste trabalho é apresentado o impacto do sistema na disponibilidade da linha de produção.

De acordo com a simulação realizada, o tempo total de parada do sistema em cinco anos de operação é de 49,8 horas, valor alto para um sistema de automação. A indisponibilidade do sistema é causada por falhas ocorridas em seus componentes e o tempo indisponível depende do tempo necessário para o reparo.

Uma informação importante do relatório de simulação é o RS DTCl (*ReliaSoft Downtime Criticality Index*). Este é um índice relativo que mostra a contribuição do bloco para o tempo de inatividade do sistema, ou seja, o tempo de inatividade do sistema causado pelo bloco dividido pelo tempo total de inatividade do sistema. A Tabela 4.5 mostra o DTCl agrupado por modelo de componentes do sistema junto com outras informações agrupadas.

No ranking deste indicador, a placa GEN100 aparece em primeiro lugar sendo responsável por 9,13 horas de indisponibilidade ou 18,3% do total. Interessante notar que a placa GEN100 não apresenta o maior número de falhas, são três falhas esperadas contra cinco da placa DI. O tempo maior de indisponibilidade é devido ao maior tempo de parada de cada evento de falha neste componente, onde o tempo de identificação de falha é maior, bem como o tempo de retomada de produção.

Tabela 4.5 - Informações sobre DTCl por modelo de componente

MODELO COMPONENTE	QUANTIDADE INSTALADA	FALHAS ESPERADAS	TEMPO INDISPONÍVEL	RS DTCl TOTAL
GEN100	5	3,045	9,1269	18,32%
DI	386	4,758	7,1439	14,38%
REMOTO	110	2,106	6,2919	12,62%
AI	25	2,481	3,7181	7,47%
RACK_P	5	0,969	3,5737	7,17%
SSI232	11	1,538	3,2252	6,47%
DO	141	1,846	2,7619	5,48%
ICV150	7	1,04	2,1781	4,38%
CPU_P	5	0,654	1,9549	3,93%
VLIO	9	0,817	1,7276	3,46%
AO	46	0,995	1,491	3,01%
GTW	8	0,483	1,447	2,90%
DIZ232	11	0,683	1,4342	2,88%
FONTE_A2	3	0,369	0,7362	1,48%
BRO	4	0,339	0,6835	1,37%
RACK_A1	2	0,168	0,5838	1,17%
CPU930	2	0,175	0,4366	0,88%
CPU970	3	0,171	0,429	0,87%
ICV196	8	0,157	0,3295	0,67%
FONTE_A1	2	0,102	0,2054	0,41%
PFB	3	0,081	0,1712	0,34%
BEM334	2	0,059	0,1459	0,30%
FIBRAS	1	0,003	0,0164	0,03%
TOTAL	799	23,039	49,8 horas	100%

Fonte: O autor (2019)

O componente GEN100 é seguido por DI, REMOTO, AI, RACK_P e SSI232, respectivamente. Os três primeiros já figuram como os principais causadores de falhas no sistema como apresentado anteriormente. No indicador DTCl, o componente REMOTO aparece antes do componente AI por quê requer configuração mais complexa durante a substituição e assim o tempo de parada é maior.

Uma diferença importante entre indicadores é observada no componente RACK_P, que aparece em nono no ranking de FCI e em quinto no DTCl. Apesar de ser esperada apenas uma falha neste componente, a parada é longa pois trata-se do rack do controlador principal e a substituição é complexa comparada a outros componentes.

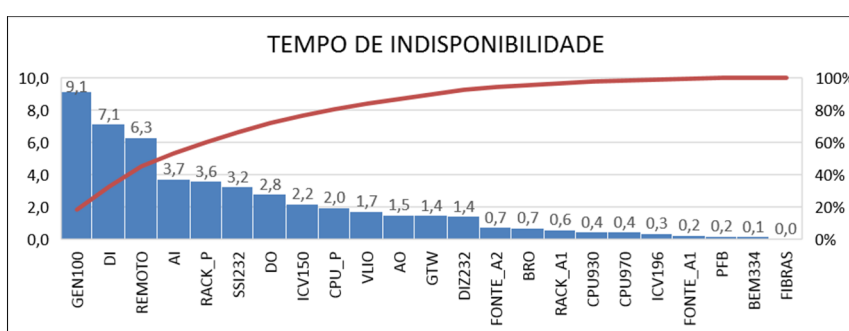
O componente SSI232 está posicionado em sexto lugar nos dois indicadores. Trata-se de um cartão de leitura de encoder com quatro canais. Apesar de apresentar probabilidade de falha considerável, tem tempo de parada reduzido quando comparado a algumas placas.

4.6 ANÁLISE DE MANTENABILIDADE

Aumentar a confiabilidade neste tipo de sistema é tarefa complexa devido à dificuldade de alterações no projeto. É um sistema composto por placas eletrônicas com projeto bem definido para sua aplicação. Além disso, para a maioria dos casos, não existe manutenção preventiva que garanta aumento do tempo de vida do componente. Assim, o caminho para melhoria de disponibilidade é otimizar o tempo de parada de cada evento de falha. Conhecer a manutenibilidade de cada componente permite identificar os principais responsáveis pela indisponibilidade do sistema e definir oportunidades de melhoria.

A Figura 4.17 mostra o Pareto com os principais responsáveis por indisponibilidade do sistema. A mesma sequência foi apresentada anteriormente na Tabela 4.5.

Figura 4.17 - Tempo de indisponibilidade do sistema



Fonte: O autor (2019)

Para o modelamento da manutenibilidade de cada componente do sistema, foi considerado o tempo desde a parada do equipamento na hora da falha até seu retorno ao funcionamento sem extrair tempos de logística, preparação ou montagem de peças. Analisando cada caso é possível identificar as atividades que compõem o tempo total e sugerir a redução de tempo de cada etapa, entre elas:

1. Tempo de diagnóstico da falha
2. Localização de peças no almoxarifado
3. Preparação e configuração de peças
4. Substituição do componente

O tempo médio de indisponibilidade por parada foi calculado através da divisão do tempo indisponível pelo número de paradas esperado de cada componente. O resultado dos seis primeiros componentes é apresentado na Tabela 4.6. Com esta informação foi possível avaliar oportunidades de redução do tempo da indisponibilidade de cada componente.

Tabela 4.6 - Tempo de parada por falha

MODELO COMPONENTE	QUANTIDADE INSTALADA	FALHAS ESPERADAS	TEMPO INDISPONÍVEL (h)	TEMPO/FALHA (h)
GEN100	5	3,045	9,1269	3,00
DI	386	4,758	7,1439	1,50
REMOTO	110	2,106	6,2919	2,99
AI	25	2,481	3,7181	1,50
RACK_P	5	0,969	3,5737	3,69
SSI232	11	1,538	3,2252	2,10

Os componentes DI e AI, são cartões de painéis remotos onde a substituição é relativamente simples. Para reduzir o tempo de parada do sistema deve-se trabalhar na redução de tempo de identificação da falha e a localização de sobressalentes no almoxarifado.

O componente REMOTO é o principal cartão eletrônico dos painéis remotos e necessita de configuração especial com ferramenta específica para a configuração, o que prolonga o tempo de indisponibilidade. Para a redução do tempo de parada neste componente é necessário que a ferramenta de configuração seja de fácil acesso, e que a equipe de manutenção possua capacitação na utilização desta ferramenta.

A placa GEN100 tem o maior impacto na disponibilidade devido sua alta taxa de falha e alto tempo de intervenção. É uma placa localizada no controlador principal que realiza a comunicação com os painéis remotos. O desafio para redução de tempo de parada é o treinamento da equipe de manutenção no diagnóstico de falha que é de difícil identificação.

RACK_P é o rack do controlador principal. A identificação de falha neste componente é relativamente rápida já que todo o sistema entra em falha. Já a substituição é lenta pois é necessário transpor todas as placas e conexões. Sendo difícil reduzir o tempo de parada, uma estratégia aplicável é a manutenção preventiva para aumento da vida do componente.

Uma oportunidade de redução de tempo foi identificada no componente SSI232. É uma placa responsável pela leitura de encoder e possui quatro canais. Os controladores analisados neste sistema não utilizam todos os canais disponíveis, e os canais não utilizados podem ser tratados como canais reservas, sendo utilizados em caso de queima de canal em qualquer cartão do rack. Considerando a maioria dos eventos de falha neste cartão é a queima de um canal, esta ação poderia reduzir consideravelmente o tempo de indisponibilidade deste componente do sistema. Para isso os canais reservas devem estar sempre prontos para utilização.

4.7 SUGESTÕES PARA MELHORIAS DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos na análise RAM, foram propostas algumas ações com o objetivo de melhorar os resultados de confiabilidade de manutenibilidade e, por consequência, aumentar a disponibilidade do sistema. Algumas ações para componentes específicos foram citadas acima e são eventualmente repetidas aqui de forma mais abrangente.

4.7.1 Manutenção preventiva nas fontes e racks dos controladores

Os racks dos controladores principais são compostos por fontes robustas que garantem o seu funcionamento. As análises mostraram que as falhas nos racks foram tipicamente devido ao mau funcionamento da fonte de alimentação. Testes em laboratório identificaram deterioração de alguns capacitores com redução de sua capacitância típica e consequente queima de outros componentes. A partir desta análise, outras fontes foram testadas e a mesma degradação foi identificada com tendência de falha. A mesma conclusão foi obtida através de análise e falhas nas

fontes dos controladores auxiliares. Então foi definida a troca preventiva desses capacitores.

Outro componente passível de manutenção nos racks são os ventiladores existentes para refrigeração da fonte e das placas dos controladores. Inspeções periódicas e troca preventiva nesses ventiladores foram definidas para garantir a correta refrigeração dos controladores.

Estas duas ações têm impacto na confiabilidade do rack.

4.7.2 Melhoria no diagnóstico de falhas

A primeira etapa da solução de um evento de parada na linha de produção é a identificação da falha. Analisando os casos de parada por falha no sistema de automação foi verificado que o tempo de diagnóstico é relativamente alto devido principalmente à falta de sinalização clara da falha e falta de capacitação da equipe neste tipo de diagnóstico.

A maioria das placas eletrônicas deste sistema possuem *leds* ou *displays* que sinalizam o diagnóstico da placa em caso de falhas, essa sinalização varia em cada placa e não é de conhecimento da maioria da equipe que atende o equipamento. A primeira ação aqui é a disponibilização de manuais simples e práticos ao lado de cada controlador indicando o significado de cada sinalização nas placas de cada controlador, o que facilita o diagnóstico em caso de falhas.

A segunda ação compreende a capacitação da equipe de manutenção, que tem pouco conhecimento das ferramentas de diagnóstico já existentes nas interfaces dos controladores, mas poderia facilmente utilizar tais ferramentas após a capacitação.

Estas duas ações têm impacto importante, pois podem reduzir o tempo necessário para identificação correta da falha.

4.7.3 Organização de sobressalentes

Após a identificação do componente em falha, o passo seguinte é providenciar o sobressalente, que fica armazenado em almoxarifado central distante do equipamento. Aqui foram identificadas algumas oportunidades de ganho de tempo.

A primeira ação é deixar ao lado de cada controlador a lista de peças sobressalentes com os códigos de identificação para localização no almoxarifado. Ação simples que reduz o tempo de pesquisa no sistema de gestão de sobressalentes.

A segunda ação é dentro do almoxarifado, no armazenamento dos sobressalentes. As peças eletrônicas são armazenadas em região específica do almoxarifado com refrigeração e limpeza apropriadas. Porém são inseridas nas prateleiras de acordo com a ordem de chegada e disponibilidade de espaço, podendo inclusive peças de mesmo modelo ser colocadas em locais diferentes. É proposta aqui uma organização no local de armazenamento de modo a agrupar as peças sobressalentes de acordo com sua aplicação. Assim, por exemplo, todas as placas do controlador principal são armazenadas no mesmo local, assim como os cartões de painéis remotos e assim por diante. Esta ação reduz o tempo de localização da peça no almoxarifado durante eventos de parada de linha, bem como eventuais verificações ou testes nesses equipamentos.

4.7.4 Preparação e teste de sobressalentes

A confiabilidade do sobressalente é muito importante para a agilidade da intervenção. Se a peça reserva não funciona após a troca, além de aumentar o tempo de parada, pode levar a interpretação incorreta da falha. É proposto realização de testes em todas as peças reservas para garantir seu correto funcionamento, bem como a criação de tarefa periódica no sistema de manutenção para realização desses testes.

Algumas placas precisam de configurações especiais, que requerem softwares e ferramentas específicas e os sobressalentes são comprados sem estas configurações. Realizar tais configurações após a falha prolonga consideravelmente o tempo de para da linha de produção, por isso é sugerido que sejam realizadas as todas as configurações possíveis das peças sobressalentes para que, em eventual necessidade, o tempo de substituição seja reduzido.

4.7.5 Utilização de canais reservas

Na maioria dos controladores, a capacidade de conexões externas para sinais digitais, analógicos e de *encoder*, por exemplo, é maior que o total de conexões utilizadas. Algumas análises mostraram falhas somente em um canal de entrada e saída específico e a placa foi substituída pois o sistema não estava pronto para utilizar o canal reserva ou falta de conhecimento da equipe sobre a utilização se utilizar os canais reservas sem substituir a placa do controlador.

Sugere-se a preparação dos circuitos e programas dos controladores de modo que os canais reservas possam ser utilizados de forma prática, com tempo reduzido e sem necessidade de substituição da placa, quando possível.

Enquanto a substituição de uma placa pode gerar uma parada de mais de 2 horas no equipamento, a utilização de um canal reserva previamente preparado não deve gerar mais de 30 minutos de parada.

4.7.6 Garantia de disponibilidade de sobressalentes

A simulação realizada para os próximos cinco anos de operação mostra a quantidade de falhas esperada em cada componente e, conseqüentemente, a quantidade peças reservas necessárias para substituição. Esta referência deve ser utilizada para garantir a manutenção de estoque mínimo para cada componente do sistema, considerando ainda que outras linhas de produção podem utilizar o componente.

A existência da peça reserva é fundamental para os resultados simulados neste trabalho, que considerou a sua existência em cada evento de falha. A ausência pode prolongar consideravelmente o tempo de indisponibilidade até a obtenção de peça equivalente ou contingências para a situação.

4.8 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi possível calcular a probabilidade de redução da disponibilidade do sistema de automação em uma das linhas de produção da empresa

ArcelorMittal Vega. O estudo mostra-se abrangente abrindo oportunidade para aplicação do método em outras linhas de produção.

Considerando que a maioria das linhas de produção utilizam os mesmos equipamentos no sistema de automação, a análise de dados de vida realizadas neste trabalho poderão ser aproveitadas bem como os modelos de manutenibilidade. Será necessário apenas configurar o diagrama de blocos de acordo com a arquitetura de automação de cada linha e produção.

5 CONCLUSÃO

A Engenharia da Confiabilidade tem ampla aplicação em sistemas reparáveis como pode ser observado no presente trabalho. Este conjunto de técnicas abrangem diversos conceitos e permite calcular estatisticamente a chance de um equipamento ou sistema falhar, o tempo previsto para colocá-lo em funcionamento, a quantidade de sobressalente necessário para a continuidade operacional e até mesmo ações para melhoria da confiabilidade humana.

O presente trabalho traz a aplicação da Engenharia de confiabilidade em complexo sistema de automação instalado em uma linha de produção contínua de bobinas de aço Laminadas a frio. Esta linha produção é a única no Brasil pertencente ao maior grupo siderúrgico do mundo. Por isso o trabalho é de vital importância para garantia de desempenho e continuidade operacional.

O estudo contemplou o sistema de automação e controle responsável pela maioria dos equipamentos da linha produção composto por diversos controladores variados tipos de placas eletrônicas e redes de comunicação. Diagramas de blocos de cada controlador e rede foram elaborados utilizando o software Blocksim chegando ao nível de componente.

A análise de dados de vida de cada componente foi realizada através do software Weibull++ e os modelos obtidos alimentaram os blocos do Blocksim. Os modelos de mantabilidade de cada componente também foram obtidos e parametrizados no Blocksim para permitir o cálculo de disponibilidade do sistema. A base de dados para análise de Confiabilidade e Mantabilidade contou com informações de paradas do equipamento e de consumo de peças dos últimos anos.

Os resultados de confiabilidade mostram aumento de falhas no decorrer dos anos depois de passado o período de comissionamento e aprendizagem do sistema. Isso era de se esperar mesmo em um sistema composto basicamente por peças eletrônicas que por vezes são considerados sistema com falhas aleatórias. Não foram encontradas muitas oportunidades para aumento de confiabilidade atual do sistema através de manutenção preventiva, pois a maioria das placas eletrônicas não é passível de substituição de componentes. A manutenção em racks e fontes de alimentação com substituição de capacitores e ventiladores podem prologar a vida desses equipamentos e de outras placas do rack. Esta foi uma ação importante com o objetivo de redução de falhas, bem como.

Além desta ação, para aumentar a confiabilidade do sistema seria necessário atualizar o sistema com tecnologias mais recentes e com maior confiabilidade, visto que o sistema está obsoleto e a maioria das placas já não é fabricada. Nesse caso seria necessário investimento considerável.

Por outro lado, o trabalho identificou algumas oportunidades para aumento da disponibilidade através da melhoria da manutenibilidade do sistema. Durante as análises foram identificados os principais fatores que impactam no tempo de parada da linha de produção quanto ocorre um evento de falha neste sistema. Foi considerado desde a detecção da falha, passando por logística de sobressalente e configuração de peças, e finalmente a montagem final e liberação para funcionamento. Ações foram propostas para esses fatores com expectativa de redução do tempo de atendimento através de melhorias no diagnóstico, treinamento da equipe, reorganização dos sobressalentes, configuração de peças reservas entre outras. Após a implantação das ações espera-se ganho considerável na disponibilidade da linha desses equipamentos.

Além dos ganhos obtidos diretamente na linha de produção objeto deste estudo, as ações definidas aqui têm impacto em outras linhas que utilizam os mesmos equipamentos e são atendidas pela mesma equipe de manutenção. Os ganhos em outras linhas de produção serão calculados em estudos futuros.

A aplicação de técnicas da Engenharia de Confiabilidade foi crucial nos resultados deste trabalho, o foram muito bem suportadas pelos softwares utilizados para as análises e simulações necessárias.

5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho aumentou significativamente o conhecimento na área de engenharia de confiabilidade, abrindo portas para novas oportunidades de estudos bem como ações para melhoria dos resultados de confiabilidade de equipamento da empresa. Abaixo são listados alguns trabalhos que se considera possível realizar no futuro:

- Inclusão, na análise RAM deste trabalho, outros componentes elétricos da linha de produção, tais como motores, inversores e painéis de operação.
- Avanço neste estudo com aplicação de análise de ciclo de vida para definir o melhor momento para investimento em novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL S/A. Arcelor Mittal Vega - Aços Planos. Disponível em: <<http://vega.arcelormittal.com/empresa/empresa.asp>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

BARAN, L. R. **Proposta de um Modelo Multicritério para Determinação da Criticidade na Gestão da Manutenção Industrial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2015.

BIROLINI, A. **Reliability Engineering: Theory and Practice**. Fifth Edition. ed. Nova York: Springer Science & Business Media, 2007.

CALIXTO, E.; BRETAS, R. Aálise RAM+L: Um estudo integrado de várias unidade de Produção de uma Refinaria. **23º Congresso Brasileiro de Manutenção - Abraman**, 2008.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística: para Engenharia e Ciências**. 6ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

BRANCO FILHO, G. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GNEDENKO, B.; PAVLO, I.; USHAKOV, I. **Statistical Reliability Engineering**. New York: John Wiley e Sons, Inc, 1999.

LEEMIS, L. M. **Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods**. Nova York: Prentice Hall, 1995.

Blanchard, B. S. and Fabrycky, W. J. **Systems Engineering and Analysis**, 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1990.

MORTELARI, D.; SIQUEIRA, K.; PIZZATI, N. **O RCM na quarta geração da manutenção - A moderna gestão de ativos**. 2ª. ed. São Paulo: RG Editores, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

RELIASOFT. ReliaWiki. **reliawiki.org**, 2019. Disponível em: <http://www.reliawiki.org/index.php/Basic_Statistical_Background>. Acesso em: 15 jun. 2019.

RELIASOFT. **ReliaSoft**, 2019. Disponível em: <<https://www.reliasoft.com/products/reliability-analysis/blocksims>>. Acesso em: 30 jun. 2019.

RELIASOFT. **ReliaSoft**, 2019. Disponível em: <<https://www.reliasoft.com/products/reliability-analysis/weibull>>. Acesso em: 01 jul. 2019.

SMITH, D. D. J. **Reliability, maintainability and risk**. 8^a. ed. Nova York: Butterworth-Heinemann, 2011.

WERNER, L. **Modelagem dos Tempos de Falha ao Longo do Calendário**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1996.