



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ - UESPI
CENTRO DE TECNOLOGIA E URBANISMO - CTU
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO PAULO MELO DE CARVALHO
TUPINAMBÁ MESSIAS DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM MÁQUINAS
DE SOLDA POR INDUÇÃO COM ÊNFASE NOS MÓDULOS ELETRÔNICOS.**

TERESINA - PI

2025

JOÃO PAULO MELO DE CARVALHO
TUPINAMBÁ MESSIAS DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM MÁQUINAS
DE SOLDA POR INDUÇÃO COM ÊNFASE NOS MÓDULOS ELETRÔNICOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Piauí (UESPI) como requisito mínimo para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Sob orientação do Profº Esp. Marcelo Helvécio Omena De Albuquerque Máximo.

TERESINA - PI

2025

C331a Carvalho, João Paulo Melo de.

Avaliação da eficiência da manutenção preventiva em máquinas de solda por indução com ênfase nos módulos eletrônicos / João Paulo Melo de Carvalho, Tupinambá Messias da Silva Júnior. – 2025.
61 f. : il.

Monografia (graduação) – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual do Piauí, *Campus* Poeta Torquato Neto, Teresina-PI, 2025.

“Orientador: Prof. Esp. Marcelo Helvécio Omena de Albuquerque Máximo.”

1. Manutenção Preventiva. 2. Solda por Indução. 3. Módulos Eletrônicos. I. Silva Júnior, Tupinambá Messias da. II. Título.

CDD 621.46

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM MÁQUINAS
DE SOLDA POR INDUÇÃO COM ÊNFASE NOS MÓDULOS ELETRÔNICOS.**

JOÃO PAULO MELO DE CARVALHO

TUPINAMBÁ MESSIAS DA SILVA JÚNIOR

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, habilitação Eletrotécnica e aprovado em sua forma final pela Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Piauí.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Esp. Marcelo Helvécio Omena De Albuquerque Máximo
Presidente

Prof. Me. Juan de Aguiar Gonçalves
Membro

Prof. Me. José Vitor Sekeff Budaruiche Sousa
Membro

AGRADECIMENTOS

A princípio, agradeço primeiramente a Deus por me proteger, me guiar e pela saúde.

Dedico essa grande conquista principalmente aos meus pais, Soraia Amazonas de Melo e João Batista Soares de Carvalho, com imensa gratidão pelas oportunidades e incentivos recebidos ao longo da minha caminhada.

Agradeço profundamente à minha família, que sempre me ofereceu apoio incondicional durante toda a minha trajetória acadêmica. Cada palavra de incentivo, cada gesto de cuidado e cada demonstração de confiança foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Sou grato pela paciência, compreensão e força transmitidas nos momentos mais desafiadores, permitindo que eu persistisse e concluísse esta etapa tão importante da minha vida.

Agradeço à minha namorada, Virna De Sousa Santana, por estar ao meu lado em todos os momentos da reta final da minha trajetória acadêmica e durante a elaboração deste projeto. Sua presença constante, motivação, apoio e força diária foram essenciais para que eu mantivesse o foco e a determinação até a conclusão deste trabalho. Sou profundamente grato por todo o carinho, compreensão e incentivo ao longo desse processo.

Expresso também minha gratidão aos meus amigos, que me apoiaram nos momentos de maior pressão e sempre acreditaram na minha capacidade. O incentivo, as conversas e o companheirismo de cada um foram essenciais para manter minha motivação ao longo dessa jornada.

Agradeço ao Prof. Me. Juan De Aguiar Gonçalves pelo apoio contínuo ao longo da minha formação. Suas orientações, conselhos e contribuições técnicas foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Sou especialmente grato pela oportunidade de realizar a transferência externa, possibilitada pelo seu incentivo e suporte. Seu comprometimento e dedicação foram essenciais para que eu avançasse com segurança e confiança nesta jornada, contribuindo diretamente para a construção deste trabalho e para minha evolução enquanto estudante.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Esp. Marcelo Helvécio Omena de Albuquerque Máximo, pela disponibilidade, orientação e confiança depositada durante o desenvolvimento deste projeto. Suas contribuições e direcionamentos foram indispensáveis para a consolidação deste trabalho.

Registro ainda meu profundo agradecimento a um grande amigo que já não está entre nós, Herick Renan Barbosa Sousa. Antes mesmo da minha entrada na UESPI, ele me guiou pacientemente no meu primeiro estágio, compartilhando conhecimentos, orientações e amizade sincera. Sua lembrança permanece viva, e sua contribuição fez parte da construção do profissional que me tornei.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento ao meu parceiro de TCC, Tupinambá Messias da Silva Júnior, pela colaboração, comprometimento e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também à minha turma da UESPI, pela convivência, companheirismo e troca de conhecimentos ao longo desses anos, que tornaram essa trajetória mais leve e enriquecedora.

João Paulo Melo De Carvalho

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde ao longo de toda esta caminhada acadêmica. Sem Sua presença, nada disso seria possível.

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão. Aos meus pais Elizandra Ferreira Pires de Carvalho e Tupinambá Messias da Silva e aos meus irmãos João Vitor Ferreira Pires e Messias e Maria Ester Nascimento de Carvalho, pelo amor incondicional, pela educação e por acreditarem no meu potencial mesmo nos momentos em que eu duvidei de mim. A vocês, minha eterna admiração e reconhecimento. Aos demais familiares que torceram por mim, meu muito obrigado. Aos meus professores, que contribuíram de forma indispensável para minha formação. Em especial ao professor Marcelo Máximo, meu orientador, pela paciência, orientação cuidadosa, sugestões valiosas e pelo incentivo constante para que este trabalho alcançasse seu melhor. Aos colegas de curso e amigos que estiveram ao meu lado durante essa jornada, compartilhando estudos, angústias, conquistas e risadas. Cada um de vocês tornou esse processo mais leve e significativo. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste TCC. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada troca de conhecimento fizeram diferença nesse percurso.

Tupinambá Messias Da Silva Júnior

RESUMO

A manutenção preventiva desempenha um papel crucial na indústria moderna, especialmente em ambientes de alta produção e equipamentos sensíveis, como as máquinas de solda por indução utilizadas na fabricação de tubos metálicos. Com a crescente complexidade dos sistemas eletrônicos industriais, como os módulos de solda, a manutenção preventiva surge como uma estratégia fundamental para garantir a continuidade dos processos produtivos, reduzir custos operacionais e aumentar a confiabilidade dos sistemas. No contexto da fabricação de tubos de aço, os geradores de solda por indução são responsáveis por processos que exigem precisão e estabilidade térmica, sendo, portanto, suscetíveis a falhas que podem comprometer a qualidade do produto final e a eficiência da produção. O objetivo deste trabalho é analisar a eficácia da manutenção preventiva nas máquinas de solda por indução, com foco especial nos módulos eletrônicos críticos. O estudo busca identificar os principais modos de falha nos componentes eletrônicos, avaliar os indicadores de desempenho, como o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), o Tempo Médio para Reparo (MTTR) e a disponibilidade operacional, e comparar o desempenho dos equipamentos antes e após a implementação das ações preventivas. Através da coleta de dados históricos de manutenção, foi possível observar a relação entre as falhas recorrentes e suas causas, permitindo a aplicação de ações preventivas direcionadas a cada modo de falha identificado. A análise dos dados revelou uma melhoria significativa nos indicadores operacionais, com aumento do MTBF, redução do MTTR e maior disponibilidade dos equipamentos, resultando em uma operação mais estável e econômica. Além disso, a avaliação econômica do impacto das ações preventivas evidenciou a redução de custos com reparos emergenciais e falhas não planejadas, proporcionando um retorno sobre investimento (ROI) positivo. Este estudo ressalta a importância da manutenção preventiva para garantir a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de solda por indução, contribuindo para a melhoria contínua dos processos industriais e sustentando a competitividade no setor.

Palavras-chave: Manutenção Preventiva. Solda por Indução. Módulos Eletrônicos.

ABSTRACT

Preventive maintenance plays a crucial role in modern industries, particularly in high-production environments and sensitive equipment such as induction welding machines used in metal tube manufacturing. As industrial electronic systems, like welding modules, become increasingly complex, preventive maintenance emerges as a fundamental strategy to ensure operational continuity, reduce operational costs, and improve system reliability. In the context of steel tube production, induction welding generators are responsible for processes that require precision and thermal stability, making them susceptible to failures that can compromise product quality and production efficiency. This study aims to analyze the effectiveness of preventive maintenance in induction welding machines, with a special focus on critical electronic modules. The research seeks to identify the primary failure modes in electronic components, assess performance indicators such as Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time to Repair (MTTR), and operational availability, and compare equipment performance before and after the implementation of preventive actions. Through the collection of historical maintenance data, the study identified recurring failures and their causes, allowing for the application of targeted preventive actions for each identified failure mode. Data analysis showed significant improvements in operational indicators, with increased MTBF, reduced MTTR, and higher equipment availability, resulting in more stable and cost-effective operations. Additionally, the economic evaluation of the impact of preventive actions highlighted the reduction of costs related to emergency repairs and unplanned failures, providing a positive return on investment (ROI). This study emphasizes the importance of preventive maintenance in ensuring the efficiency and reliability of induction welding systems, contributing to continuous improvement in industrial processes and sustaining competitiveness in the sector.

Keywords: Preventive Maintenance. Induction Welding. Electronic Modules.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Eficiência Operacional	14
Figura 2 - Processo de solda por forja	15
Figura 3 – Detalhes do processo de sobreposição	16
Figura 4 – Fabricação de Tubos de Aço Sem Costura	17
Figura 5 - Processo de Solda Com Baixa Frequência	18
Figura 6 - Solda Kiesierling	19
Figura 7 - Processo De Solda De Tubos Soennichsen	21
Figura 8 – Processo de Solda Thermatool	22
Figura 9 – Circuito Equivalente a Thermatool	22
Figura 10 - Solda Por Indução e Alta Frequência	23
Figura 11 - Circuito Elétrico de solda por indução	24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Grafico da expressão da profundidade de penetração	12
Gráfico 2 - Evolução Mensal do MTBF	43
Gráfico 3 - Redução do MTTR por semestre	44
Gráfico 4 - Disponibilidade Operacional antes x Depois	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modos de falha identificados nos módulos eletrônicos	38
Tabela 2 – Indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade	42
Tabela 3 – Comparativo econômico antes X depois	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação modos de falha × mecanismos físicos envolvidos	40
Quadro 2 – Síntese interpretativa dos indicadores de confiabilidade	45
Quadro 3 - Comparação geral antes X depois	47
Quadro 4 – Impactos eletrotérmicos observados	48

LISTA DE SIGLAS

CMMS - Sistema de Gerenciamento de Manutenção Computadorizado

ERP – Planejamento de Recursos Empresariais

FMEA – Efeitos de Falha

GMAW – Soldagem a Arco de Metal a Gás

GTAW – Soldagem a Arco de Tungstênio a Gás

IGBT – Transistor Bipolar de Porta Isolada

MES – Sistema de Execução de Manufatura

MP – Manutenção Preventiva

MTBF – Tempo Médio Entre Falhas

MTTR – Tempo Médio de Reparo

PCM – Planejamento e Controle de Manutenção

PCM – Planejamento e controle de manutenção

Pré-MP – Antes da Implantação da Manutenção Preventiva Estruturada

RCA - Análise de Causa Raiz **RCA** – Análise de Causa Raiz

SMAW – Soldagem a Arco Metálico Blindado

SMD – Dispositivos eletrônicos montados diretamente na superfície da PCI

ZAC – Zona Aquecida

SUMÁRIO

1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo Geral.....	4
1.1.2 Objetivos específicos.....	4
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1 Manutenção preventiva: conceitos e importância	6
2.1.1 Primeira Geração: Manutenção Corretiva	7
2.1.2 Segunda Geração: Manutenção Preventiva	7
2.1.3 Terceira Geração: Manutenção Preditiva	8
2.1.4 Quarta Geração: Enfoque em Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade	9
2.1.5 Manutenção Preventiva: Aspectos Favoráveis e Restrições Operacionais	9
2.2 Processo de solda de tubos por forja.....	16
2.3 Processo de solda sobreposta de tubos	16
2.4 Solda por resistência elétrica	17
2.5 Tubos de aço sem costura.....	18
2.6 Processo de solda por resistência com baixa frequência	18
2.7 Solda Acetileno	19
2.8 Solda por fusão a gás (Kiesierling)	19
2.9 Osciladores eletrônicos.....	20
2.10 Processo de solda Fretz-Moon	21
2.11 Processo de solda de tubos Soennichsen	21
2.12 Solda de tubos por alta frequência	22
2.13 Solda por indução e alta frequência.....	24
2.14 Estrutura de geradores de solda por indução	25
2.15 Otimização de geradores indutivos.....	27
2.15.1 Ferrite e "Impeder"	28
2.15.2 Comprimento do Elemento Magnético.....	29
2.15.3 Refrigeração do "Impeder".....	29
2.15.4 Dimensionamento e Posicionamento do "Impeder".....	29
2.15.5 Indutor	30
2.15.6 Condutores de Ligação.....	30
2.15.7 Paralelismo entre as Bordas da Fita Metálica	30
2.15.8 Refrigeração Forçada	31
2.15.9 Manutenção Preventiva em Geradores de Solda à Válvula	31
3 METODOLOGIA	32
3.1 Tipo de pesquisa.....	32
3.2 instrumentos e procedimentos de coleta de dados	32
3.3 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE DADOS	34

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Identificação dos principais modos de falha nos módulos eletrônicos	38
4.1.1 Interpretação técnica dos modos de falha	40
4.2 Indicadores de desempenho: MTBF, MTTR e Disponibilidade	42
4.2.1 Análise detalhada do MTBF	44
4.2.2 Análise detalhada do MTTR	45
4.2.3 Evolução da Disponibilidade operacional	46
4.3 Comparação operacional antes e depois da manutenção preventiva	47
4.3.1 Impacto sobre a qualidade do produto	49
4.3.2 Desempenho térmico e elétrico	49
4.4 Análise Econômica: custos, economia e retorno operacional	50
4.4.1 Interpretação econômica	51
4.4.2 Benefícios indiretos	52
5 CONCLUSÃO	54
5.1 Perspectivas Futuras	58
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

Macedo (2015) observa que as atividades de manutenção em uma organização consistem na utilização de várias abordagens e para cuidar de suas instalações físicas, cada empresa adota a abordagem mais adequada ou a combinação dessas para diferentes circunstâncias e situações em que se encontram seus equipamentos. Dentre estas abordagens destacam-se as manutenções corretivas, preventivas e preditivas. A relação entre esses tipos de manutenção é intrínseca, uma vez que cada um, de certa forma, complementa o outro. Dessa forma, por meio desse procedimento, as empresas obtêm benefícios significativos quanto ao desempenho global dos equipamentos.

Quanto aos tipos de manutenção, define-se por corretiva aquela com a finalidade de corrigir falhas à medida que surgem, de maneira que se caracteriza por ser uma correção emergencial de defeitos que se manifestam inesperadamente, isto é, esse tipo de manutenção não é realizado com base em um planejamento prévio (FREITAS, 2016). Já a preditiva corresponde, por sua vez, em avaliar a vida útil dos componentes de máquinas e equipamentos, além de avaliar suas condições gerais de funcionamento, com o objetivo principal de utilizá-los ao máximo antes que ocorra alguma falha inesperada. (ENGETELES, 2018).

A manutenção preventiva, foco do presente estudo, é essencial para garantir que máquinas e equipamentos funcionem bem no dia a dia. Seu principal objetivo é evitar falhas antes que elas aconteçam, garantindo que tudo opere da melhor forma possível. Quando essa prática é aplicada corretamente, os equipamentos trabalham de forma contínua e eficiente, sem interrupções inesperadas. Isso tem um impacto direto na rotina das empresas, já que a maior disponibilidade e desempenho das máquinas ajudam a reduzir custos com consertos e paralisações. Com isso, os processos produtivos se tornam mais estáveis, bem planejados e econômicos, o que é fundamental tanto para o ensino quanto para a prática profissional nas áreas técnicas e de engenharia (MACEDO, 2015).

Desse modo, a previsibilidade de custos de manutenção com máquinas e equipamentos é uma estratégia que vem sendo cada vez mais utilizada por empresas e organizações que buscam alcançar resultados significativos através da aplicação de

planejamento e controle da manutenção (PCM). Com isso, é possível ter acesso a uma estimativa e realizar uma previsão do tempo que a máquina fica parada para manutenção preventiva e correção de falhas (MACEDO, 2015).

No ambiente industrial siderúrgico, um equipamento bastante comum é o gerador de solda utilizado na fabricação de tubos de aço. Seu desenvolvimento foi impulsionado pelo avanço da indústria e pela necessidade de produzir tubos confiáveis, que pudessem ser usados em caldeiras e máquinas a vapor, especialmente durante a automação dos primeiros teares. Atualmente, os tubos de aço são empregados em uma ampla variedade de aplicações — desde peças de automóveis, bicicletas e eletrodomésticos até sistemas de tubulação em usinas nucleares (SILVA, 1997).

A partir dessa realidade, notou-se que a manutenção preventiva em geradores de solda por indução, utilizados na soldagem de tubos metálicos, é essencial para garantir a continuidade do processo produtivo e evitar prejuízos operacionais. Esses equipamentos operam sob condições intensas e, com o tempo, sofrem desgaste natural que, se não for monitorado, pode causar falhas sérias. A falta de manutenção adequada aumenta o risco de paradas inesperadas, comprometendo os prazos de produção e afetando diretamente a eficiência da indústria. Além das interrupções na operação, um dos maiores impactos da negligência com a manutenção é o alto custo com peças e reparos emergenciais. Muitas vezes, as falhas ocorrem de forma repentina, exigindo a substituição de componentes caros e de difícil acesso, o que resulta em custos não planejados. Esse tipo de despesa pode desestabilizar o orçamento da empresa e, em casos mais graves, inviabilizar a continuidade da produção por longos períodos.

Sendo assim, estabelece-se a pergunta-problema que orienta este estudo: Qual o impacto da aplicação de práticas de manutenção preventiva nos módulos eletrônicos das máquinas de solda por indução, em termos de confiabilidade, disponibilidade operacional e redução de custos na produção de tubos metálicos?

A formulação dessa questão justifica-se pela importância estratégica que esses equipamentos têm dentro da linha de produção. Rupturas inesperadas, falhas intermitentes, degradação térmica de componentes eletrônicos e instabilidades no processo de soldagem levam a perdas produtivas expressivas, aumento do retrabalho, prejuízo na qualidade final do tubo e elevação dos custos de manutenção corretiva. Segundo Oliveira e Xavier (2020), a ausência de planejamento estruturado

impede que a organização antecipe falhas e otimize intervenções, conduzindo a um ciclo de operação reativo que reduz competitividade e aumenta o risco operacional.

Além disso, estudos recentes destacam que sistemas baseados em eletrônica de potência — como geradores de indução — apresentam sensibilidade elevada a variações térmicas, harmônicas e sobrecorrentes, e, portanto, se beneficiam diretamente de intervenções preventivas regulares. Assim, compreender o comportamento dos indicadores MTBF, MTTR e disponibilidade antes e depois da implementação das ações preventivas torna-se essencial para demonstrar, com base empírica, se a manutenção preventiva gera benefícios concretos para o processo industrial.

Sob a perspectiva prática, portanto, este estudo se justifica pela necessidade de reduzir custos de parada, aumentar a segurança operacional e melhorar a disponibilidade dos equipamentos, aspectos essenciais para a competitividade e continuidade produtiva da indústria. Já no âmbito acadêmico, a pesquisa contribui para o aprofundamento das discussões sobre confiabilidade, manutenção preventiva e eletrônica de potência aplicada a processos industriais — temáticas que, embora amplamente estudadas, carecem de análises empíricas voltadas especificamente a geradores de solda por indução em ambientes reais de produção.

Por fim, para facilitar a compreensão do estudo, este trabalho está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução, os objetivos e a contextualização do problema; o Capítulo 2 reúne o referencial teórico sobre manutenção preventiva, soldagem por indução e confiabilidade; o Capítulo 3 descreve a metodologia adotada para coleta e análise dos dados; o Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos; e o Capítulo 5 traz as conclusões, limitações e sugestões para pesquisas futuras.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a eficácia das práticas de manutenção preventiva em módulos eletrônicos, por meio da identificação dos principais modos de falha, da avaliação dos indicadores de desempenho da manutenção e da comparação do desempenho operacional antes e após a implementação das ações preventivas, visando determinar sua influência na confiabilidade, na produtividade e nos custos do processo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência da manutenção preventiva em máquinas de solda por indução, com ênfase nos módulos eletrônicos, no período de janeiro de 2024 a janeiro de 2025. A medição será realizada utilizando o indicador de tempo médio entre falhas, com base nos dados coletados dos relatórios de manutenção preventiva e registros de falhas fornecidos pelo setor de manutenção.
- Identificar as principais falhas nos módulos eletrônicos das máquinas de solda por indução, analisando os tipos de falhas mais recorrentes. Os dados serão obtidos a partir dos relatórios diários de manutenção, notas de serviço e sistemas de gestão de manutenção computadorizada. A medição será feita com base no número de falhas por mês e na frequência de ocorrências de cada tipo de falha.
- Analisar o impacto da manutenção preventiva na redução do tempo de inatividade das máquinas, usando os dados de operação das máquinas e tempos de inatividade registrados no sistema de monitoramento de produção. A medição será realizada através da fórmula:

$$\text{Tempo de inatividade} = \frac{\text{Tempo Total de Parada}}{\text{Tempo Total de Operação}}$$

- Estabelecer indicadores de desempenho para a manutenção preventiva, como o tempo médio entre falhas e o tempo médio de reparo. Estes indicadores serão calculados utilizando os dados obtidos nos relatórios de falhas e notas de manutenção, para avaliar a eficácia da manutenção preventiva nos módulos eletrônicos das máquinas.
- Comparar a eficiência da manutenção preventiva com a manutenção corretiva, analisando a redução de custos operacionais e o aumento da produtividade das máquinas. A comparação será feita utilizando os custos totais de manutenção, e os índices de produção antes e depois da implementação de melhorias na manutenção preventiva. A medição será realizada por meio da fórmula de retorno sobre investimento:

$$\text{Retorno sobre investimento} = \frac{\text{Ganho de produtividade} - \text{Custo de manutenção}}{\text{Custo de manutenção}}$$

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MANUTENÇÃO PREVENTIVA: CONCEITOS E IMPORTÂNCIA

A manutenção é fundamental dentro do ambiente industrial, pois garante não apenas a disponibilidade dos equipamentos, mas também a continuidade dos processos produtivos. Para Francielle *et al.* (2020), essa atividade corresponde a um conjunto de técnicas e ações planejadas com o objetivo de manter ou atender uma determinada produção com o menor custo possível. Dessa forma também pode ser entendida como um grupo de ações que são realizadas para melhorar os seus defeitos de qualidade ocasionados por danos decorrentes do seu funcionamento, além de reduzir a necessidade de reparo das máquinas e equipamentos. (MAROCCO, 2013).

O papel da manutenção tem evoluído de forma contínua ao longo dos avanços tecnológicos, desde seu surgimento no contexto da Revolução Industrial, conforme apontado na literatura acadêmica (FRANCIELLE, 2020). Ao longo desse processo, a manutenção deixou de ser apenas uma atividade corretiva e operacional, tornando-se um elemento estratégico fundamental para as organizações modernas.

Segundo Viana (2002), a manutenção, termo originado do latim *manus tenere*, que significa “manter o que se tem”, está presente na trajetória humana desde os primórdios do uso de instrumentos destinados à produção.

Essa visão mostra que a manutenção não é algo recente, mas sim uma prática enraizada na história da humanidade, ainda que de forma menos estruturada e que pode ser dividida em gerações (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.1.1 Primeira Geração: Manutenção Corretiva

A primeira geração da manutenção iniciou-se por volta da década de 1930. O principal traço dessa fase era o modelo corretivo, ou seja, "se quebrar, conserte". Características dessa fase incluem: equipamentos simples e muitas vezes superdimensionados, baixa pressão por produtividade e ausência de processos sistemáticos de manutenção.

Alan Kardec & Julio Nascif (2008) apontam que essa geração antecede a Segunda Guerra Mundial, uma época na qual a indústria não possuía os equipamentos complexos e a alta demanda de produção que surgiriam em anos posteriores. A manutenção nessa fase era limitada a práticas como limpeza e lubrificação dos equipamentos. Francielle et al. (2020) destacam que, nesse período, a manutenção era vista como uma atividade secundária, e a execução das operações era quase simultânea à produção. A introdução da produção em massa nas indústrias foi um fator-chave para o surgimento de setores voltados para a manutenção corretiva.

Além disso, Soeiro (2017) observa que a estabilidade no mundo dos negócios e a falta de competição intensa durante esse período significavam que os estoques elevados não causavam grandes custos para as indústrias, o que tornava desnecessária a manutenção sistemática.

2.1.2 Segunda Geração: Manutenção Preventiva

A partir do fim da Segunda Guerra Mundial e até meados dos anos 60, começou a segunda geração da manutenção, que marcou o início da manutenção planejada ou sistemática. Durante essa fase, as principais características foram: programas de inspeção, sistemas de planejamento e controle de trabalho e uso de grandes e lentos computadores. Os impactos da guerra, como o aumento da demanda e a escassez de mão de obra, tornaram essencial a maximização da produtividade. A automação das fábricas foi uma solução para esse problema.

Segundo Alan Kardec & Julio Nascif (2008), a crescente utilização de máquinas complexas aumentou o número de falhas, o que fez com que o planejamento da manutenção se tornasse uma necessidade. Costa (2013) argumenta que o alto custo com peças de reposição e o aumento no número de falhas obrigaram as indústrias a estabelecer setores específicos de manutenção. Para Soeiro (2017), a segunda geração da manutenção foi caracterizada pela busca por maior disponibilidade e confiabilidade. Nesse sentido, o conceito de manutenção preventiva surgiu como resultado da dependência do bom funcionamento das máquinas, onde a inatividade do maquinário gerava prejuízos significativos para as empresas.

2.1.3 Terceira Geração: Manutenção Preditiva

A terceira geração, que se estendeu dos anos 1970 aos anos 2000, foi marcada pelo aprimoramento das técnicas de manutenção planejada e pela introdução de novos métodos, especialmente a manutenção preditiva. As características principais dessa fase foram: monitoramento de condições, computadores pequenos e rápidos, sistemas inteligentes.

Segundo Alan Kardec & Julio Nascif (2008), a automação crescente e a tendência global de produção just-in-time foram fatores que impulsionaram a manutenção preditiva. A automação aumentava a frequência das falhas na produção, e o modelo just-in-time, embora eficaz na redução de custos, gerava danos significativos devido a falhas não programadas em sistemas de produção e estoque limitados. Soeiro (2017) aponta que o avanço da informática foi crucial para o controle mais eficiente do planejamento de manutenção. A eficiência da manutenção passou a ser medida pela disponibilidade, confiabilidade e capacidade de manutenção dos equipamentos. Otani et al. (2008) ressalta que, com o uso expandido de computadores e o desenvolvimento de tecnologias de medição, a engenharia de manutenção aprimorou os critérios de previsão de falhas, otimizando os processos de manutenção.

2.1.4 Quarta Geração: Enfoque em Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade

A quarta geração da manutenção, iniciada na década de 1990, foi uma continuação dos conceitos e fatores da terceira geração, mas com um foco ainda maior em três aspectos principais: disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade. Esses fatores também contribuíram para consolidar a Engenharia de Manutenção dentro das organizações. A tendência dessa fase foi o uso de práticas de manutenção preditiva, monitoramento contínuo das condições dos equipamentos e a busca por minimizar interrupções na produção.

Kardec & Nascif (2009) indicam que, a partir dessa geração, a manutenção corretiva não planejada passou a ser vista como um indicador de ineficiência. As novas práticas de manutenção exigem uma colaboração mais estreita entre as áreas de engenharia, manutenção e operação, buscando otimizar a confiabilidade, disponibilidade e reduzir os custos ao longo do ciclo de vida dos equipamentos.

2.1.5 Manutenção Preventiva: Aspectos Favoráveis e Restrições Operacionais

Com o avanço da tecnologia e o surgimento de equipamentos mais complexos, a manutenção deixou de ser apenas uma atividade corretiva para se tornar também preventiva, preditiva e estratégica, visando reduzir custos e aumentar a disponibilidade (KARDEC; NASCIF, 2009).

Em um cenário atual de competitividade global, empresas que investem em técnicas modernas de manutenção conseguem não apenas aumentar sua eficiência operacional, mas também prolongar a vida útil de seus ativos, evitando falhas inesperadas e garantindo maior confiabilidade no processo produtivo. Nesse sentido, a manutenção preventiva é uma alternativa eficaz para essa realidade (KARDEC; NASCIF, 2009).

A manutenção preventiva é definida como o conjunto de atividades planejadas e programadas em intervalos regulares, com o intuito de evitar falhas e manter o

equipamento em boas condições operacionais. De acordo com Kardec e Nascif (2009), a manutenção preventiva é baseada em ações programadas, como inspeções, ajustes, substituições e lubrificação, realizadas de forma periódica, independentemente de haver ou não sinais de falha iminente.

De acordo com Junior (2018), a manutenção preventiva é considerada o "coração das atividades de manutenção", englobando diversas ações sistêmicas, como inspeções, troca de peças e reformas. Essa manutenção deve ser realizada periodicamente e é vista como a principal abordagem de manutenção em qualquer empresa.

Segundo Xenos (2014), ao se adotar a manutenção preventiva, a frequência das falhas diminui, a disponibilidade dos equipamentos aumenta e as interrupções inesperadas na produção são reduzidas. O custo total acaba sendo mais baixo, já que a manutenção preventiva é mais barata que a corretiva em muitas situações, devido ao controle das paradas dos equipamentos, evitando interrupções inesperadas por falhas.

Ela é indicada para sistemas e componentes que são suscetíveis ao desgaste contínuo e gradual, como em equipamentos críticos que, se falharem, podem comprometer a operação de uma planta ou unidade industrial. A manutenção preventiva deve ser planejada de acordo com as condições operacionais do sistema e com as características do equipamento, incluindo fatores como segurança pessoal, exigências ambientais e a necessidade de substituir componentes conforme o ciclo de vida estimado (KARDEC; NASCIF, 2009).

Trata-se de uma estratégia mais avançada, baseada no monitoramento contínuo da condição do equipamento, com o objetivo de prever falhas antes que elas ocorram, realizando intervenções apenas quando os dados indicam a necessidade. Para Kardec e Nascif (2009), a manutenção preditiva utiliza técnicas como análise de vibração, termografia, ultrassom e análise de óleo, para monitorar variáveis críticas do equipamento e detectar sinais de desgaste ou anomalia que possam comprometer seu desempenho.

Apesar de ser amplamente adotada, a manutenção preventiva pode apresentar desvantagens, como o custo adicional das intervenções que ocorrem independentemente da real condição do equipamento. Kardec e Nascif (2009) mencionam que, em alguns casos, essa abordagem pode resultar em manutenções desnecessárias em equipamentos que ainda estariam operando de forma eficiente, o

que gera um custo operacional sem agregar valor à operação. Porém, a principal vantagem da manutenção preventiva é a redução de paradas não programadas, a melhoria da confiabilidade e o aumento da segurança operacional.

A principal vantagem da manutenção preditiva é sua capacidade de minimizar custos com intervenções, já que as manutenções são realizadas somente quando necessário. Isso evita tanto o custo de manutenções excessivas, como na preventiva, quanto os custos elevados da manutenção corretiva, que ocorre em situações emergenciais. No entanto, a implementação de uma estratégia preditiva exige um investimento inicial considerável em tecnologia de monitoramento e na capacitação da equipe para interpretar os dados gerados. Kardec e Nascif (2009) observam que, embora a manutenção preditiva seja altamente eficaz em sistemas de monitoramento contínuo, sua adoção é mais comum em ambientes industriais onde o custo das falhas pode ser extremamente alto, como em indústrias químicas, petroquímicas e metalúrgicas.

Cada tipo de manutenção — corretiva, preventiva e preditiva — tem um papel específico na gestão de ativos. A manutenção corretiva é útil em situações emergenciais, mas pode gerar altos custos devido a paradas inesperadas. A manutenção preventiva, embora eficiente, pode ser excessiva se aplicada sem análise das condições reais do equipamento, acarretando custos desnecessários. Já a manutenção preditiva, ao utilizar tecnologias de monitoramento, permite intervenções mais precisas e econômicas, otimizando a utilização de recursos e melhorando a confiabilidade dos ativos. A escolha entre esses tipos de manutenção depende das necessidades do processo produtivo, considerando fatores como criticidade do equipamento, custo das falhas e disponibilidade de tecnologia.

A união de materiais, particularmente por meio da soldagem metálica, constitui um elemento central na engenharia e na manufatura modernas. Com o avanço tecnológico, os processos de união tornaram-se cada vez mais eficientes e controláveis. Tradicionalmente, métodos como a soldagem a arco (SMAW, GMAW e GTAW) predominam no setor industrial devido à sua versatilidade e robustez (MODENESI; MARQUES, 2011). No entanto, a crescente demanda por altas taxas de produção, aquecimento localizado e controle preciso do ciclo térmico tem elevado a relevância de processos baseados em energia de alta frequência, como a soldagem por indução (SI).

A soldagem por indução distingue-se por não requerer contato físico direto com a peça de trabalho para gerar calor, proporcionando maior segurança, limpeza do processo e permitindo automação avançada com repetibilidade notável, aspectos essenciais em indústrias de grande volume e alta precisão (FOCO Induction, 2023).

O funcionamento de uma máquina de solda por indução depende da interação entre um campo magnético variável e o material condutor. Uma corrente alternada (CA) de alta frequência é aplicada ao indutor, gerando um campo magnético conforme a Lei de Ampère. Quando esse campo penetra na peça metálica, induz correntes elétricas internas denominadas correntes parasitas ou de Foucault, de acordo com a Lei de Faraday da Indução Eletromagnética. A resistência elétrica do material dissipa a energia dessas correntes na forma de calor, de acordo com a Lei de Joule:

$P = I^2 \cdot R$, onde P é a potência térmica, I a corrente induzida e R a resistência elétrica do material.

O aquecimento interno, ao contrário dos métodos por condução ou convecção, permite taxas de aquecimento elevadas e eficientes. A distribuição de calor é fortemente influenciada pela frequência da corrente alternada, fenômeno conhecido como efeito pelicular (skin effect), em que correntes de alta frequência se concentram na superfície do condutor. A profundidade de penetração térmica δ é calculada pela expressão:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (2.1)$$

σ = profundidade de penetração (m)

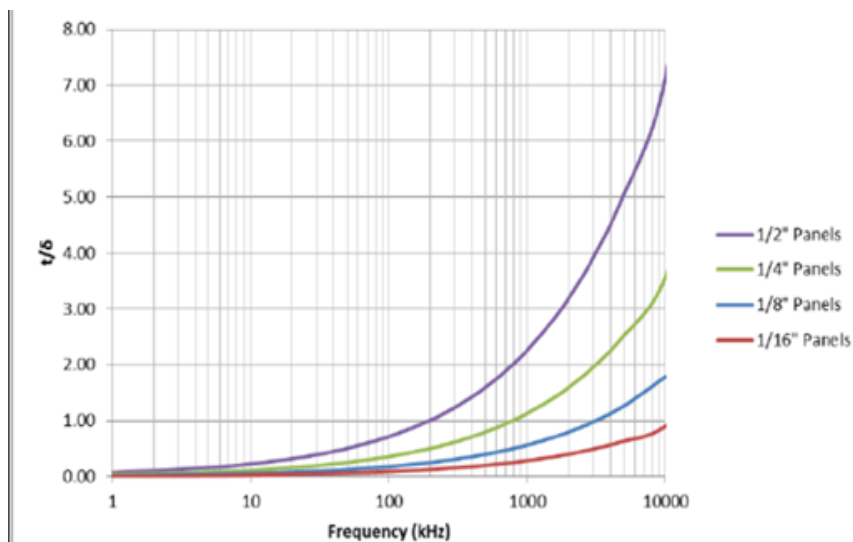
f = frequência da corrente (Hz)

σ = condutividade elétrica do material (S/m)

μ = permeabilidade magnética do material (H/m)

π = constante pi

Gráfico 1- Grafico da expressão da profundidade de penetração



Fonte - CRAIG, 2006.

Em que f é a frequência da corrente alternada, σ a condutividade elétrica do material e μ sua permeabilidade magnética. Essa relação demonstra que a profundidade de aquecimento é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência, sendo ideal para aplicações que requerem aquecimento superficial rápido, como tubos de alta frequência (30 kHz a 450 kHz) (INFOSOLDA, 2025).

O sistema de soldagem por indução compreende três componentes principais: o gerador de energia, o indutor e o sistema de refrigeração. O gerador converte energia elétrica da rede (50/60 Hz) em energia de alta frequência, frequentemente utilizando transistores IGBT de estado sólido, garantindo eficiência superior a 90% e controle digital preciso (FOCO Induction, 2023). O indutor, geralmente fabricado em cobre com refrigeração a água, é projetado sob medida para a geometria da peça, determinando o acoplamento magnético, o foco do calor e a eficiência da transferência energética. O sistema de refrigeração é essencial para manter a operação contínua e segura, devido às elevadas potências envolvidas.

A soldagem por indução é amplamente aplicada na indústria, com destaque para a soldagem de tubos por alta frequência (HFIW), caracterizada como processo

de soldagem por pressão em estado sólido. Este processo envolve a conformação da tira metálica em formato tubular, aquecimento das bordas em “V” e posterior coalescência por compressão (PEREIRA, 2020; ENRX, 2024). Além disso, a brasagem e a soldagem suave por indução são utilizadas para unir metais de adição, oferecendo aquecimento rápido e localizado, ideal para componentes eletrônicos e de cobre (FOCO Induction, 2023).

Entre as principais vantagens do processo estão o controle preciso do calor, alta eficiência energética, ambiente limpo e seguro e elevada produtividade. Entre os desafios destacam-se o projeto específico do indutor, dificuldades com materiais não ferrosos e a necessidade de rigoroso controle da zona aquecida (ZAC). O controle de qualidade é realizado por meio da medição do aporte térmico, monitoramento óptico de temperatura e ensaios não destrutivos, como ultrassom e correntes parasitas. As aplicações industriais estratégicas incluem produção de tubos e oleodutos, brasagem de componentes automotivos e união de ligas sensíveis em setores aeroespacial e eletrônico.

No contexto da confiabilidade e eficiência de sistemas industriais, a confiabilidade é definida como a capacidade de um sistema desempenhar sua função de forma contínua, enquanto a eficiência relaciona-se ao aproveitamento máximo dos recursos energéticos e operacionais (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2017, p. 297). Nos sistemas elétricos industriais, a confiabilidade depende da correta seleção de equipamentos, coordenação de proteção, redundância em sistemas críticos, manutenção preventiva e análise de riscos, sendo medida por indicadores como MTBF (tempo médio entre falhas) e MTTR (tempo médio de reparo).

Figura 1 - Eficiência Operacional

Unit No.	Year	No. of failure per year	Total operating time between maintenance in the year (hours)	Expected number of Failure	Mean time between Failure (MTBF) (hours)	Total outage hours per year	Mean time to repair (MTTR) (hours)	Expected repair rate	Specific period of failure free operation (hours)	Reliability
		Φ_n	β_t	$\lambda = \frac{\Phi_n}{\beta_t}$	$m = \frac{1}{\lambda}$	ψ_i	$\zeta = \frac{\psi_i}{\Phi_n}$	$\mu = \frac{1}{\zeta}$	t	$R(t) = e^{-\lambda t}$
Turbine 1	2008	6	8219.18	0.00073	1369.86	89	14.833	0.0674	272	0.820
Turbine 2		21	6325.30	0.00332	301.20	59	2.809	0.356	232	0.463
Turbine 1	2009	16	8421.05	0.00190	526.31	37	2.312	0.432	96	0.833
Turbine 2		23	7840.91	0.00293	340.91	79	3.435	0.291	247	0.485
Turbine 1	2011	5	8025.68	0.000623	1605.14	42	8.400	0.119	278	0.841
Turbine 2		24	6266.31	0.00383	261.09	61	2.542	0.393	172	0.517
Turbine 1	2012	7	7760.53	0.000902	1108.64	46	6.571	0.152	162	0.864
Turbine 2		12	7352.55	0.00163	612.71	56	4.667	0.214	308	0.605

Fonte – ALBAYRAK 2013.

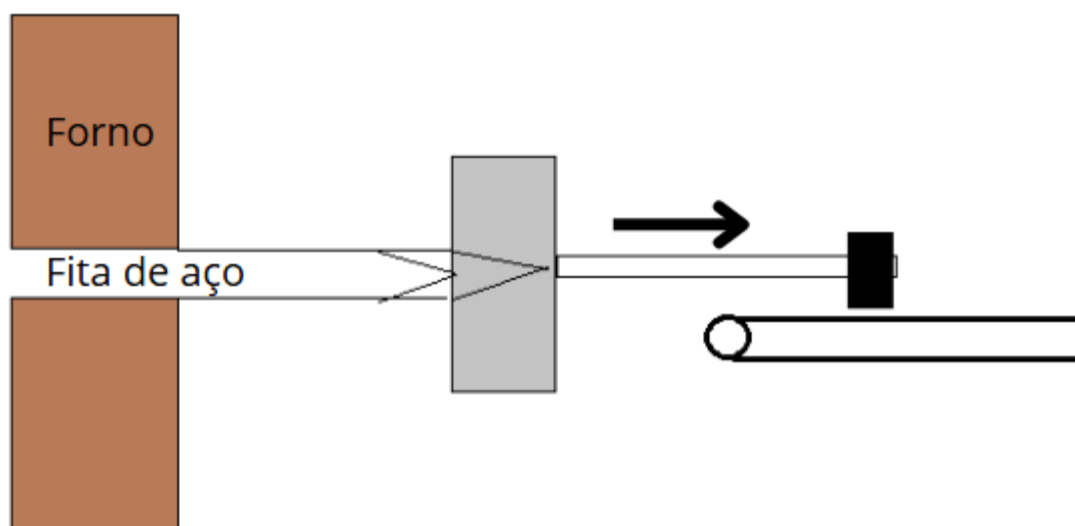
A eficiência operacional está intrinsicamente ligada à confiabilidade, pois uma proteção elétrica bem dimensionada reduz tanto a frequência quanto a duração de interrupções. Sistemas de relés digitais e plataformas SCADA permitem monitoramento contínuo e preditivo, além de garantir seletividade por tempo, corrente, energia ou lógica. A manutenção preventiva é essencial para preservar a confiabilidade, envolvendo inspeções periódicas, testes em relés, termografia, atualização de firmware, revisão de coordenação e substituição programada de componentes.

Indicadores técnicos utilizados incluem MTBF, MTTR, disponibilidade (relação entre tempo de operação e total) e índices de continuidade de fornecimento, como SAIDI/SAIFI. A integração entre confiabilidade, proteção e produtividade é indispensável para uma operação estável, eficiente e de menor custo (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2017, p. 337).

2.2 PROCESSO DE SOLDA DE TUBOS POR FORJA

O Processo de solda de tubos por forja é o primeiro marco documentado na fabricação de tubos de aço, tendo sido patenteado em 1825 por C. Whitehouse, um vendedor de aço. Este processo consistia em fazer passar uma fita de aço pré-aquecida através de uma matriz de perfil circular, realizando assim a solda por estiramento (SILVA, 1997).

Figura 2 - Processo de solda por forja



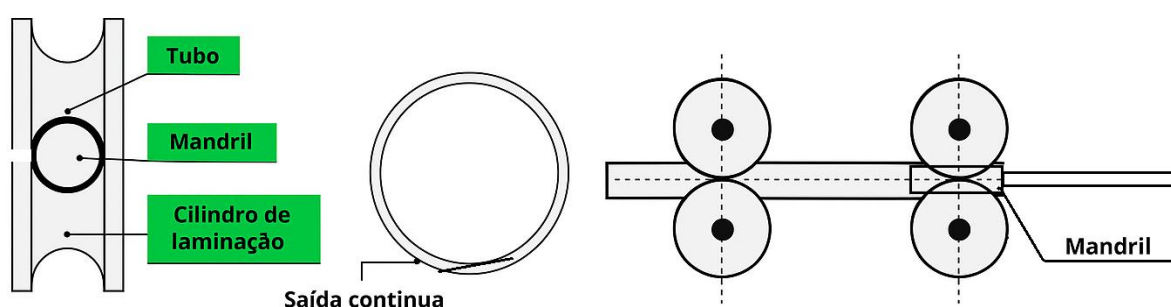
Fonte - SILVA, 1997

2.3 PROCESSO DE SOLDA SOBREPOSTA DE TUBOS

Este processo surgiu por volta de 1840, impulsionado pela grande demanda por tubos resistentes, especialmente devido à invenção da locomotiva a vapor. Na solda sobreposta, fitas de aço eram perfiladas para dar forma ao tubo, sendo em

seguida ajustadas em seus diâmetros externo e interno por meio de um laminador que utilizava rolos e um mandril interno (SILVA, 1997).

Figura 3 – Detalhes do processo de sobreposição



Fonte - SILVA, 1997

2.4 SOLDA POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

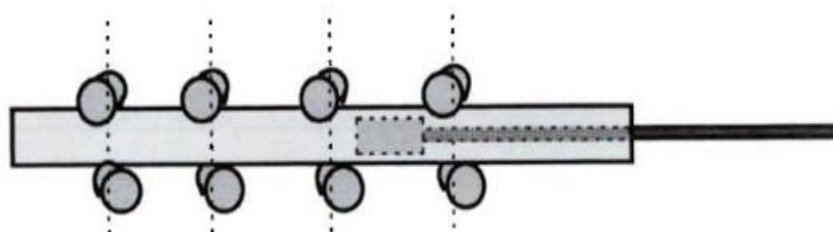
O desenvolvimento da solda por resistência elétrica baseia-se no efeito Joule, descoberto em 1856 pelo físico inglês James P. Joule, que verificou ser possível obter aquecimento pela passagem de corrente elétrica através de uma resistência. Em 1877, já se conseguia unir metais pela passagem de corrente elétrica, e em 1898, Elihu Thomson fabricou a primeira máquina de solda elétrica por resistência.

2.5 TUBOS DE AÇO SEM COSTURA

No final do século XIX, a procura por tubos de aço cresceu devido à incorporação da máquina a vapor pela indústria têxtil (PFEIFER, 1995 apud SILVA,

1997). Contudo, os processos de soldagem por pressão predominantes da época eram ineficientes, resultando em falhas quando os tubos eram submetidos a altas pressões, o que causou inúmeras explosões de caldeiras e máquinas a vapor com consequências desastrosas. Para resolver este problema, os irmãos Mannesmann desenvolveram em 1886 um processo de fabricação de tubos sem costura, utilizando tarugos de aço ao invés de fita metálica. Neste processo, o tarugo aquecido passava por rolos oblíquos para envolver um mandril interno, que definia o diâmetro interior, resultando em tubos mais confiáveis para aplicações com elevadas exigências mecânicas, como em caldeiras.

Figura 4 – Fabricação de Tubos de Aço Sem Costura

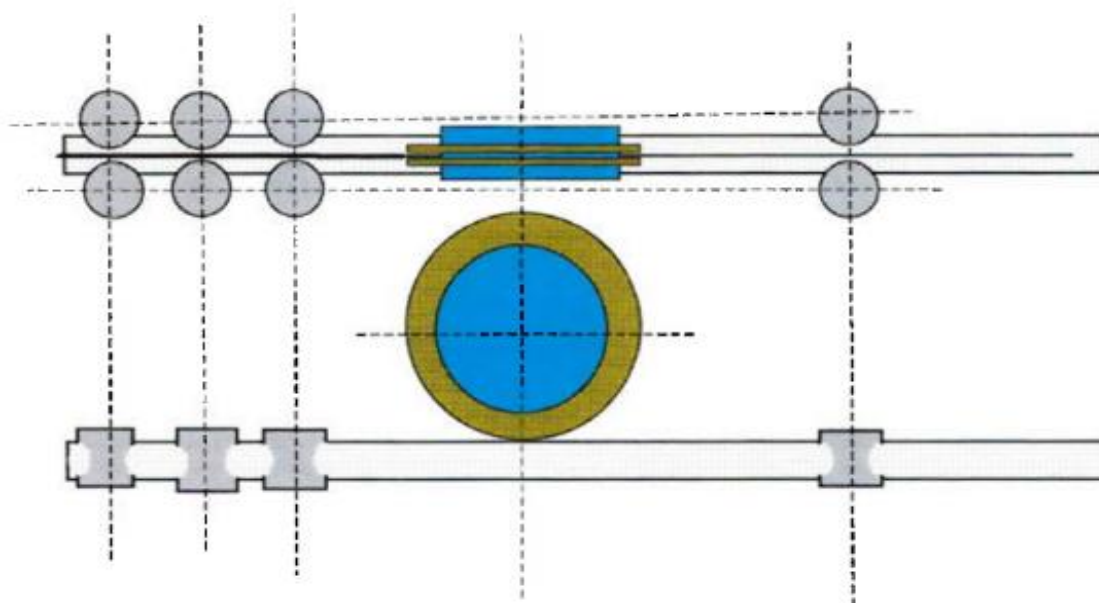


Fonte - SILVA, 1997

2.6 PROCESSO DE SOLDA POR RESISTÊNCIA COM BAIXA FREQUÊNCIA

Em 1889, a Standard Tool Company patenteou um processo de fabricação de tubos com solda por resistência que aplicava a corrente através de dois eletrodos em rolos pressurizados nas bordas do tubo ainda aberto (MANNESMANN-MEER, 1970 apud SILVA, 1997).

Figura 5 - Processo de Solda Com Baixa Frequência



Fonte - SILVA, 1997

2.7 SOLDA ACETILENO

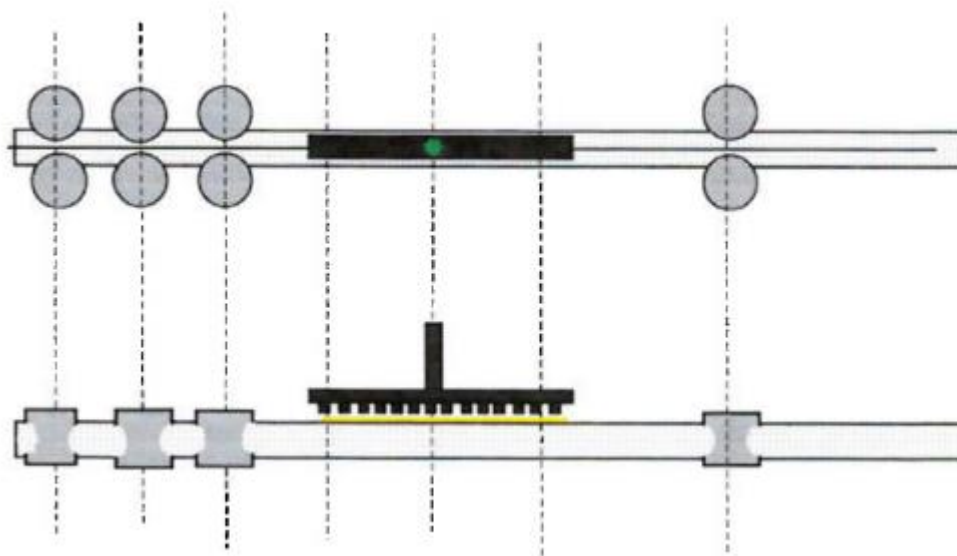
O uso da chama composta por oxigênio e acetileno para soldar materiais ocorreu pela primeira vez em 1901. Os resultados foram tão satisfatórios que o processo já era empregado comercialmente dois anos depois, muito devido ao trabalho de Fouché, que construiu o primeiro maçarico confiável, seguro e bem elaborado para soldagem (GIL; SIMONS apud SILVA, 1997).

2.8 SOLDA POR FUSÃO A GÁS (KIESIERLING)

Este método de soldagem longitudinal iniciou-se por volta de 1910 e envolvia uma máquina formadora convencional. Nela, a chapa metálica era modelada, e as

bordas eram aquecidas por um queimador que possuía vários bicos alinhados ao longo do ponto de encontro das extremidades (MANNESMANN-MEER, 1970 apud SILVA, 1997).

Figura 6 - Solda Kiesierling



Fonte - SILVA, 1997

2.9 OSCILADORES ELETRÔNICOS

Os primeiros estudos sobre osciladores eletrônicos surgiram na década de 20, realizados por Van der Pol e Liénard. Estes estudos se basearam em descobertas anteriores, como a invenção do tríodo em 1906 (simultaneamente por Robert von Lieben e Lee Forest) e a tese de Barkhausen sobre a geração de oscilações (BURIAN, 1972 apud SILVA, 1997). Por volta de 1920, Johnston conduziu estudos fundamentais, buscando uma relação entre a qualidade da solda, a velocidade do processo, a frequência elétrica, a pressão das bordas e o tempo de resfriamento. Os estudos de Johnston possibilitaram a fabricação dos primeiros tubos com costura de

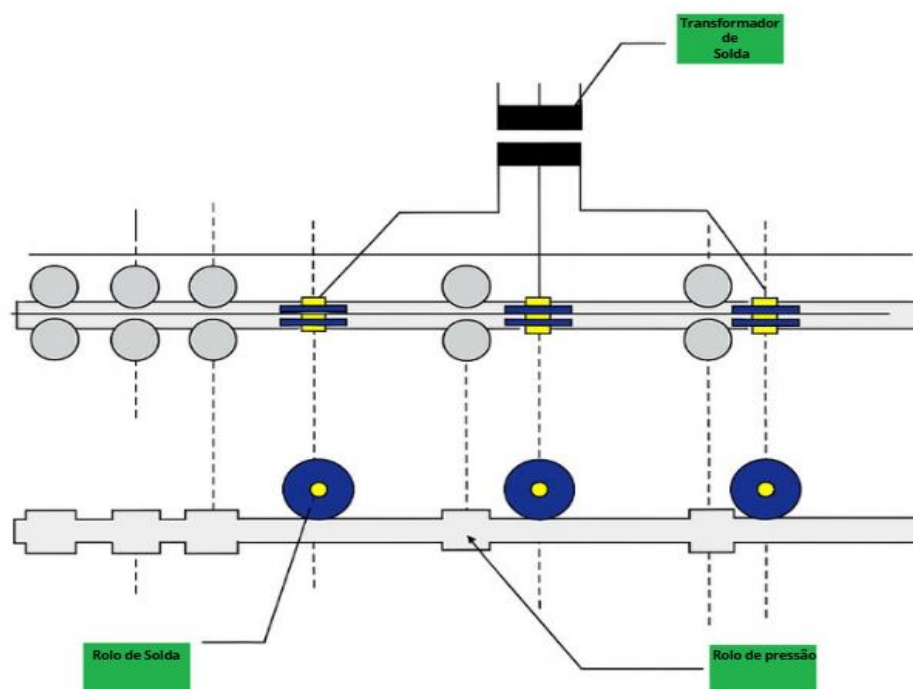
alta qualidade, adequados para uso em caldeiras e superaquecedores (MANNESMANN-MEER, 1970 apud SILVA, 1997).

2.10 PROCESSO DE SOLDA FRETZ-MOON

Em 1921, o alemão S.F. Fretz obteve êxito na fabricação contínua de tubos soldados com diâmetro externo de até 114 mm (KUCHLER, 1962 apud SILVA, 1997). A máquina utilizada por Fretz-Moon empregava pares de rolos horizontais e verticais para formar o tubo e maçaricos alinhados nas extremidades da fita. Após a soldagem, o tubo era submetido a uma calibração ou bitolagem, reduzindo seu diâmetro em cerca de 5%. Este processo foi amplamente utilizado por ser econômico e eficiente na fabricação contínua de tubos de água e gás.

2.11 PROCESSO DE SOLDA DE TUBOS SOENNICHSEN

Desenvolvido por volta de 1928 por um fabricante norueguês, o processo Soennichsen realizava a soldagem longitudinal de tubos utilizando três eletrodos na forma de rolos pressurizados dispostos ao longo do tubo (MANNESMANN-MEER, 1970 apud SILVA, 1997).

Figura 7 - Processo De Solda De Tubos Soennichsen

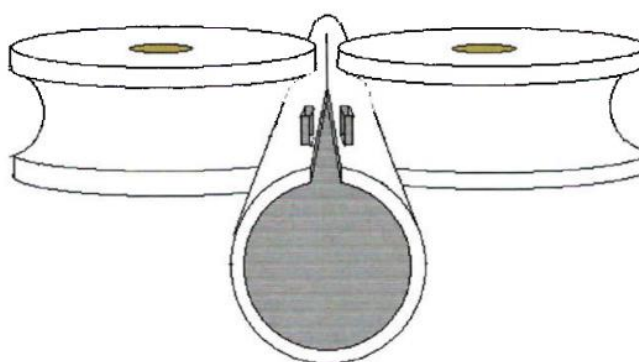
Fonte - SILVA, 1997

2.12 SOLDA DE TUBOS POR ALTA FREQUÊNCIA

Atualmente, a solda a alta frequência é o processo mais utilizado na indústria de fabricação de tubos de aço. Sua inviabilidade atual sem o desenvolvimento prévio de osciladores eletrônicos, válvulas tríodos, semicondutores, metalurgia de soldagem e sistemas mecânicos de conformação precisos, ressalta a importância dos avanços tecnológicos anteriores. As primeiras linhas de alta frequência utilizavam o processo por contato, inventado por Wallace Rudd da Thermo-tool nos anos 50 (NICHOLS, 1994 apud SILVA, 1997). Nesse método, a corrente de alta frequência é aplicada às bordas

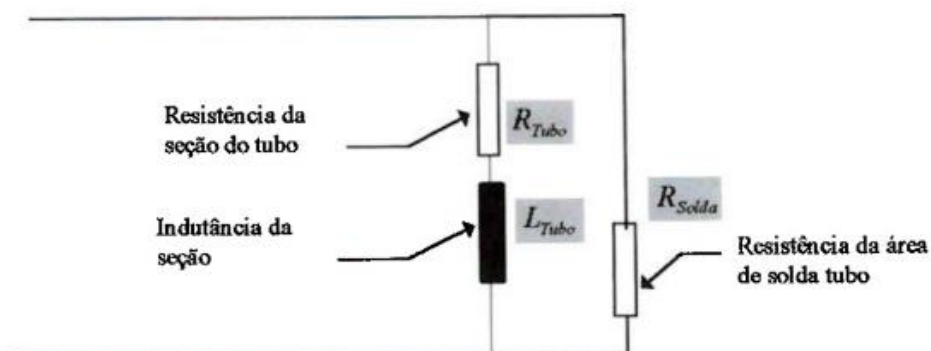
do tubo pré-formado por contatos deslizantes, criando uma geometria em "V" que concentra a corrente nas bordas para o ponto de solda. Embora o interior do tubo seja preenchido com ferrite para diminuir perdas (mantendo a corrente focada no "V"), o uso de contatos deslizantes pode danificar a superfície e causar arcos, limitando a velocidade e a qualidade final.

Figura 8 – Processo de Solda Thermoatool



Fonte - SILVA, 1997

Figura 9 – Circuito Equivalente a Thermoatool



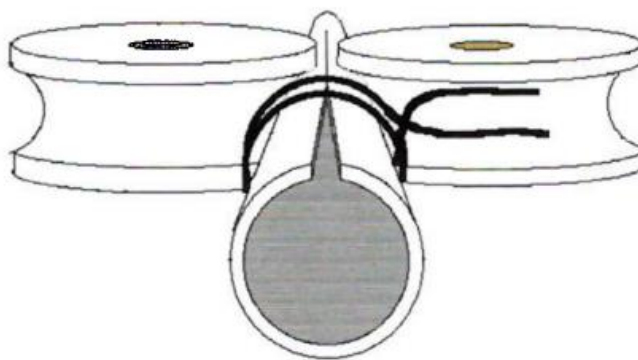
Fonte - SILVA, 1997

2.13 SOLDA POR INDUÇÃO E ALTA FREQUÊNCIA

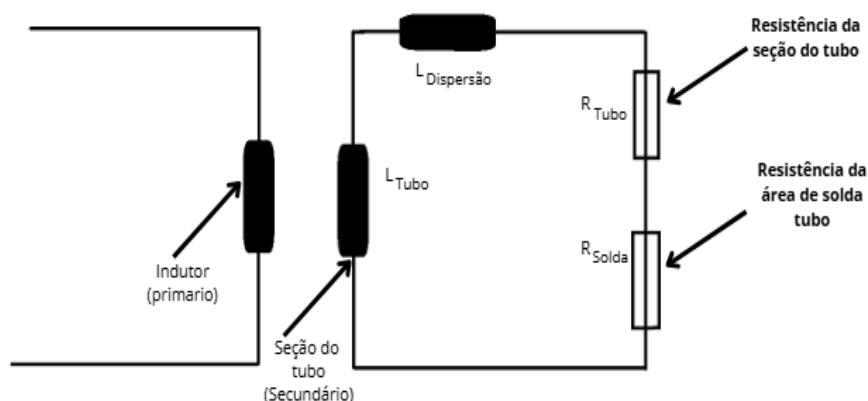
A solda por indução e alta frequência foi desenvolvida quase simultaneamente à solda por contato, mas é o sistema mais utilizado na maioria das instalações de fabricação de tubos com costura atualmente. A energia (corrente elétrica a aproximadamente 400 KHz) é transferida para o tubo através de um indutor helicoidal, eliminando a necessidade de contatos deslizantes (MANNESMANN-MEER, 1970 apud SILVA, 1997). A alta frequência faz com que a corrente induzida flua pelas extremidades da fita até o ponto de solda. O interior do tubo é preenchido com ferrite para diminuir o fluxo de dispersão e aumentar o rendimento. As principais vantagens desse processo são que ele não deixa marcas na superfície do tubo e não causa desgaste do indutor, resultando em uma qualidade de solda comparável à do contato.

O avanço dos semicondutores, como MOSFET e IGBT na década de 80, permitiu o desenvolvimento de geradores de estado sólido com frequência e potência compatíveis aos geradores à válvula, consolidando a indução como a tecnologia dominante.

Figura 10 - Solda Por Indução e Alta Frequência



Fonte - SILVA, 1997

Figura 11 - Circuito Elétrico de solda por indução

Fonte - SILVA, 1997

2.14 ESTRUTURA DE GERADORES DE SOLDA POR INDUÇÃO

Desde 1930, existem patentes relacionadas à solda por alta frequência, todavia, a solda por indução e alta frequência surgiu quase simultaneamente com a solda por contato (SILVA, 1997). Um gerador de solda por indução é um dispositivo utilizado para realizar a soldagem de tubos de aço por meio de correntes elétricas geradas por alta frequência. Esse processo de solda não envolve o contato direto entre os componentes do tubo, mas sim a indução de corrente elétrica através de um campo magnético gerado por um indutor (SILVA, 1997).

O indutor, por sua vez, trata-se de um componente crucial nesse processo, pois é ele quem cria o campo magnético necessário para induzir a corrente elétrica no tubo. A forma do indutor é geralmente helicoidal (em espiral) e envolve o tubo a ser soldado. A corrente de alta frequência gerada pelo indutor percorre a seção do tubo e aquece a área de contato, onde ocorre a fusão do material e a formação da solda (SILVA, 1997).

O processo começa quando o tubo é posicionado dentro do campo magnético gerado pelo indutor. A corrente de alta frequência induzida pela bobina começa a aquecer a superfície do tubo até atingir uma temperatura elevada o suficiente para que as extremidades se fundam. Durante este processo, o tubo passa por uma seção onde a corrente de indução é concentrada, criando o ponto de solda. A principal

vantagem desse método é que ele não exige contato direto entre as partes do tubo e os componentes da máquina de solda, como ocorre nos processos tradicionais, como a solda por contato (SILVA, 1997)

Para otimizar o processo e reduzir as perdas de energia, o interior do tubo é frequentemente preenchido com um material ferromagnético, chamado impeder, por sua vez, é utilizado para modificar as características magnéticas do material dentro do tubo. Ele é especialmente eficaz para reduzir os efeitos adversos da corrente de alta frequência que pode resultar em perdas de energia e distorção do campo magnético. O impeder ajuda a controlar o caminho da corrente induzida, garantindo que a energia se concentre na área desejada, otimizando ainda mais o processo de soldagem. Além disso, o impeder pode ajudar a minimizar o risco de defeitos na solda, como a formação de bolhas ou falhas estruturais, ao controlar de forma precisa a distribuição de energia ao longo do tubo (SILVA, 1997)

A solda por indução é considerada um processo extremamente vantajoso, pois garante uma solda limpa e de alta qualidade, sem contato físico com o material. Essa ausência de contato reduz significativamente o risco de contaminação e evita defeitos que poderiam surgir pela manipulação direta das peças. Além disso, o processo se destaca pela sua eficiência energética, uma vez que a corrente de alta frequência é induzida diretamente no material, tornando-o mais econômico e eficaz do que outros tipos de soldagem que dependem de aquecimento externo para atingir altas temperaturas (SILVA, 1997)

Outro ponto relevante é a versatilidade da solda por indução, que pode ser aplicada em tubos de diferentes tamanhos, desde pequenos diâmetros até grandes estruturas industriais, atendendo a uma ampla variedade de demandas produtivas. Essa flexibilidade faz com que o processo seja amplamente utilizado na fabricação de tubos de aço em diversas escalas de produção. A velocidade de produção também é um dos principais benefícios do método. A indução permite uma soldagem contínua e rápida, ideal para linhas de produção em larga escala, garantindo alto rendimento sem comprometer a qualidade. Por fim, a ausência de contato físico durante a soldagem contribui para o menor desgaste dos equipamentos, aumentando a durabilidade das ferramentas e componentes utilizados. Esse fator reduz custos de manutenção e substituição de peças, tornando o processo ainda mais eficiente e econômico (SILVA, 1997)

Com o desenvolvimento de semicondutores mais rápidos e de circuitos eletrônicos mais potentes, os geradores de solda por indução passaram por grandes inovações. Hoje, geradores com componentes semicondutores são capazes de operar com maior eficiência, atingindo frequências de operação mais altas, o que melhora ainda mais a qualidade da solda, especialmente quando se trabalha com tubos de grandes dimensões. Os semicondutores substituíram os geradores à válvula, que eram mais antigos e menos eficientes, devido à sua maior potência e à melhor eficiência energética (SILVA, 1997).

Historicamente, os primeiros geradores de solda eram baseados em válvulas triodo, mas esses modelos apresentavam limitações de potência e eficiência, o que dificultava o uso em tubos de maiores dimensões e com melhores acabamentos. Desde a década de 1960, com os avanços nos componentes semicondutores, como os transistores e diodos, os geradores de solda passaram a utilizar essas tecnologias para substituir as válvulas. O uso de MOSFETs e transistores IGBT possibilitou a criação de geradores com maior controle sobre a frequência e a potência, permitindo soldar tubos maiores e garantir uma soldagem mais rápida e precisa (SILVA, 1997).

2.15 OTIMIZAÇÃO DE GERADORES INDUTIVOS

Independentemente do tipo de gerador de solda utilizado, o desempenho do sistema pode ser comprometido por diversos fatores e pela falta de observação de práticas essenciais. Este capítulo apresenta ações que visam melhorar o desempenho geral do sistema, aumentar a qualidade dos tubos e reduzir os custos de manutenção dos geradores. Algumas dessas medidas são aplicáveis exclusivamente aos geradores com válvula, outras a ambos os tipos. No entanto, todas elas são de baixo custo e podem modificar significativamente a qualidade do produto final (SILVA, 1997).

2.15.1 Ferrite e "Impeder"

Para a fabricação de tubos soldados por indução de alta frequência, é necessário preencher o interior do tubo com material ferromagnético, o que garante um bom acoplamento entre o indutor (primário) e o tubo (secundário). O material mais indicado para essa função é o ferrite, que possui alta permeabilidade magnética e baixa perda Foucault. Ao ser inserido no tubo, o ferrite concentra o fluxo magnético gerado pelo indutor, impedindo que ele se disperse ao longo do tubo. Como resultado, a corrente induzida pelo campo é forçada a seguir as bordas da fita, passando por ela apenas no ponto de solda (SILVA, 1997).

Atualmente, fabricam-se ferrites com propriedades específicas, como alta permeabilidade e temperatura Curie superior a 310°C, além de uma saturação magnética adequada. Quando são utilizados ferrites de baixa qualidade, ocorre um aumento nas perdas do sistema, prejudicando o rendimento global. As perdas associadas ao ferrite são influenciadas pela temperatura Curie e pelo fluxo de saturação. Quando o ferrite é exposto a temperaturas superiores à sua temperatura Curie, ele perde suas propriedades ferromagnéticas, o que resulta em menor eficiência do sistema e redução da transferência de energia ao tubo. A utilização de ferrites com baixo fluxo de saturação também compromete a performance do sistema, pois isso leva a perdas por histerese elevadas e a uma permeabilidade próxima de zero, tornando-os inadequados para aplicações que exigem alto desempenho. (SILVA, 1997).

Para tubos de grandes diâmetros, como os que superam 30 mm, o uso de ferrite pode ser inviável devido à constante quebra do material. Nestes casos, recorre-se ao uso de "impeder", que é um concentrador de fluxo posicionado internamente ao tubo. O "impeder" é composto por um conjunto de ferrites contidos em um invólucro de material não magnético, como fibra de vidro, que tem como função concentrar o aquecimento no ponto de solda. Este componente pode ser utilizado de forma econômica, especialmente em casos onde a aplicação do ferrite não seja viável. (SILVA, 1997).

2.15.2 Comprimento do Elemento Magnético

O "impeder" deve ter um comprimento de 3 a 4 vezes o comprimento do indutor, e sua extremidade deve ultrapassar o ponto de solda em pelo menos 3 mm. Esta característica visa melhorar o fluxo magnético entre o indutor e o tubo, promovendo uma maior eficiência do processo de solda. (SILVA, 1997).

2.15.3 Refrigeração do "Impeder"

Como os ferrites que compõem o "impeder" são sensíveis a altas temperaturas, é crucial garantir que o "impeder" seja adequadamente refrigerado. Caso contrário, o material pode atingir sua temperatura Curie, o que leva à perda de suas propriedades ferromagnéticas e ao comprometimento da eficiência do sistema. A refrigeração deve ser feita com líquidos apropriados, como óleo solúvel ou água livre de partículas metálicas, que podem causar sobreaquecimento e perda de permeabilidade do ferrite. (SILVA, 1997).

2.15.4 Dimensionamento e Posicionamento do "Impeder"

O diâmetro externo do "impeder" deve ser o mais próximo possível do diâmetro interno do tubo, pois isso garante um bom fator de enchimento. Contudo, o "impeder" não deve ser excessivamente grande, para evitar problemas decorrentes de variações na espessura da fita metálica e de desafios durante a soldagem. Recomenda-se, portanto, manter uma folga mínima de 2 mm em cada lado do "impeder", para garantir que o processo de solda ocorra de maneira eficiente (SILVA, 1997).

2.15.5 Indutor

O indutor deve envolver a seção do tubo de forma a reduzir a dispersão do campo eletromagnético, sendo seu diâmetro interno o mais próximo possível do diâmetro externo do tubo. É importante garantir uma folga entre o indutor e o tubo, de modo a evitar curto-circuito. Além disso, alguns fabricantes de geradores de solda utilizam indutores revestidos com materiais isolantes para reduzir o risco de curto-circuito (SILVA, 1997).

2.15.6 Condutores de Ligação

Os condutores de ligação conectam o gerador de solda à carga (indutor). Recomenda-se que esses condutores sigam a circunferência da espira do indutor, para evitar aumento do fluxo de dispersão, o que prejudica o desempenho do sistema (SILVA, 1997).

2.15.7 Paralelismo entre as Bordas da Fita Metálica

O paralelismo entre as bordas da fita metálica tem grande impacto na qualidade da solda dos tubos. Quando as extremidades da fita não estão devidamente paralelas, a qualidade da solda diminui, a velocidade da máquina é reduzida e o rendimento do gerador cai (SILVA, 1997).

2.15.8 Refrigeração Forçada

Todos os geradores de solda, sejam eles à válvula ou a transistor, necessitam de refrigeração. O resfriamento é geralmente feito por circulação de água nos componentes do sistema. A água utilizada deve ser de boa qualidade, de preferência destilada, para evitar a acumulação de materiais e entupimentos nas tubulações. A troca periódica da água e a limpeza do sistema de refrigeração são essenciais para garantir a eficiência contínua do gerador de solda (SILVA, 1997).

2.15.9 Manutenção Preventiva em Geradores de Solda à Válvula

Com base em dados históricos de intervenções corretivas e na análise das informações fornecidas pelos fabricantes, é possível desenvolver um plano de manutenção preventiva eficaz. Esse plano deve incluir a limpeza do circuito de água destilada, a verificação dos componentes elétricos e a inspeção das proteções do sistema. Além disso, a calibração periódica de dispositivos de proteção, como pressostatos e fluxômetros, é essencial para garantir a segurança e o bom funcionamento do gerador de solda (SILVA, 1997).

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada, com abordagem predominantemente quantitativa e objetivos descritivo-explicativos. A natureza aplicada justifica-se pelo interesse em resolver um problema prático e imediato da organização: a otimização da confiabilidade e da disponibilidade das máquinas de solda por indução.

O caráter descritivo manifesta-se na etapa inicial, que consistiu na observação, registro e análise dos fenômenos sem manipulação direta das variáveis, como o mapeamento dos modos de falha e o cálculo dos indicadores de desempenho no cenário inicial. Subsequentemente, a pesquisa adquire um viés explicativo, ao buscar identificar e validar as relações de causa e efeito entre a implementação do plano de manutenção preventiva e as alterações nos indicadores de confiabilidade, disponibilidade e custo, conforme preconiza Gil (2017).

A abordagem quantitativa foi central para o estudo, utilizando-se de dados numéricos e ferramentas estatísticas para mensurar o desempenho e validar as hipóteses de melhoria. Contudo, a interpretação dos resultados incorporou elementos qualitativos, como a análise técnica das causas-raiz das falhas, conferindo maior profundidade à discussão.

3.2 INSTRUMENTOS E PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi estruturada de modo a garantir elevada abrangência, rastreabilidade e consistência documental, utilizando múltiplas fontes independentes com o objetivo de minimizar vieses operacionais. As informações necessárias ao estudo foram obtidas a partir do sistema de Gestão de Manutenção, dos relatórios técnicos da equipe de manutenção, dos logs operacionais dos geradores de solda e

da documentação física relacionada às intervenções realizadas. No PCM foram extraídas todas as ordens de serviço corretivas e preventivas registradas no período analisado, incluindo datas e horários das ocorrências, identificação dos responsáveis pelas intervenções, tempo de reparo, tempo total de parada, causas apontadas e componentes substituídos. Complementarmente, os relatórios técnicos e logs operacionais forneceram registros de falhas recorrentes, disparos de proteção, alarmes diversos e históricos de temperatura, corrente e potência dos módulos, permitindo uma compreensão aprofundada do comportamento eletrotérmico dos equipamentos.

Também foram analisados documentos físicos, como notas de peças substituídas, registros de inspeções em painéis e módulos eletrônicos e fichas de troca de componentes críticos — a exemplo de capacitores eletrolíticos, IGBTs, retificadores e placas de controle. Além disso, dados complementares de produção, incluindo volume diário e mensal produzido, horas efetivamente produtivas e paradas programadas de processos não relacionadas à manutenção, foram incorporados para contextualizar a carga operacional à qual os equipamentos estavam submetidos.

Após a etapa de coleta, os dados foram submetidos a um processo rigoroso de tratamento conforme práticas consagradas da engenharia de confiabilidade. Inicialmente, procedeu-se à eliminação de duplicidades provenientes de ordens de serviço registradas mais de uma vez. Em seguida, registros incompletos foram corrigidos mediante confronto direto entre o CMMS, os relatórios técnicos e os logs operacionais, garantindo consistência temporal e factual. Casos de dados faltantes foram analisados individualmente, sendo aplicada interpolação ou exclusão técnica, conforme a criticidade da informação e o impacto estatístico sobre os indicadores de confiabilidade. Para assegurar comparabilidade entre os períodos, todas as variáveis temporais foram padronizadas em horas, possibilitando o cálculo preciso de MTBF, MTTR e disponibilidade operacional.

Por fim, os dados foram organizados em dois grupos distintos: o período, correspondente ao cenário Pré-MP, e o período Pós-MP, refletindo o comportamento dos equipamentos após a implementação das ações preventivas. Essa segregação garantiu uma comparação homogênea, justa e metodologicamente robusta entre os

dois cenários operacionais, permitindo avaliar com precisão o impacto das intervenções adotadas.

3.3 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE DADOS

A análise dos resultados foi estruturada em três blocos principais, de forma coerente com a organização apresentada no capítulo 4 deste trabalho. Inicialmente, procedeu-se à identificação e classificação dos modos de falha dos módulos eletrônicos das máquinas de solda por indução. Essa etapa baseou-se na aplicação da FMEA, que permitiu priorizar os modos de falha considerando sua frequência de ocorrência, severidade e detectabilidade. Complementarmente, realizou-se a análise de causa raiz, a fim de compreender os mecanismos físicos subjacentes às falhas identificadas, incluindo sobreaquecimento, efeitos de harmônicos, vibrações estruturais, envelhecimento de componentes, surtos elétricos e presença de sujeira condutiva em painéis e módulos. Para reforçar a identificação das falhas de maior impacto, utilizou-se também a Análise de Pareto (80/20), que evidenciou quais ocorrências concentravam a maior parte das interrupções operacionais, integrando de forma direta esta metodologia às seções de modos de falha, interpretação técnica, quadro síntese e ações preventivas discutidas posteriormente.

Em seguida, foi conduzida a análise quantitativa dos indicadores de confiabilidade, fundamentada nos dados previamente tratados. Foram calculados os indicadores clássicos de engenharia de manutenção, incluindo o MTBF, o MTTR e a Disponibilidade Operacional, utilizando as expressões consagradas na literatura da área. O MTBF foi obtido pela razão entre o tempo total de operação e o número de falhas registradas; o MTTR foi calculado a partir da soma dos tempos de reparo dividida pelo total de ocorrências; e a disponibilidade operacional foi determinada pela relação entre MTBF e a soma MTBF + MTTR. Esses indicadores foram posteriormente comparados entre os períodos Pré-MP e Pós-MP, permitindo antecipar e validar os critérios de avaliação utilizados para mensurar o impacto da implantação da manutenção preventiva estruturada.

Para sustentar a interpretação das evoluções observadas nos indicadores, aplicaram-se diferentes técnicas estatísticas e ferramentas gráficas. A estatística descritiva forneceu informações essenciais sobre tendência central, dispersão e amplitude dos dados. Gráficos de controle foram utilizados para visualizar o comportamento temporal do MTBF e do MTTR ao longo dos meses analisados, enquanto diagramas de caixa permitiram comparar a variabilidade das falhas nos períodos anterior e posterior às intervenções. Quando aplicável, empregou-se o teste pareado para verificar a significância estatística das diferenças entre os períodos, reforçando a confiabilidade das conclusões obtidas. Além disso, análises de tendência foram conduzidas para identificar a linearidade ou mudanças de padrão nos indicadores, e comparações percentuais foram utilizadas para reforçar visualmente as melhorias obtidas, sobretudo no que se refere à disponibilidade operacional e à redução do MTTR.

Ao final, foram avaliados potenciais vieses e limitações capazes de influenciar os resultados, a fim de assegurar que as melhorias identificadas no período Pós-MP sejam atribuídas efetivamente às práticas de manutenção implantadas. Entre esses fatores, consideraram-se a sazonalidade da demanda, que pode elevar o desgaste dos equipamentos em períodos de maior produção; as diferenças entre operadores e turnos, que podem introduzir variações na operação e na forma de registro das ocorrências; intervenções paralelas não relacionadas diretamente à manutenção preventiva, que foram removidas da análise sempre que poderiam distorcer os indicadores; e alterações no processo produtivo que pudessem impactar a carga térmica ou elétrica aplicada aos módulos eletrônicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma análise abrangente e aprofundada dos resultados obtidos a partir do estudo de caso realizado nas máquinas de solda por indução utilizadas na fabricação de tubos. Os achados se concentram no comportamento operacional dos equipamentos, especialmente dos módulos eletrônicos, e na forma como a manutenção preventiva influenciou, de maneira direta e indireta, o desempenho geral do sistema produtivo. Como preconizado pela literatura de confiabilidade industrial, os resultados só podem ser plenamente interpretados quando analisados tanto sob a ótica quantitativa dos indicadores (MTBF, MTTR e disponibilidade) quanto sob a ótica qualitativa das causas, falhas potenciais, condições ambientais e características eletroeletrônicas que afetam o processo (Silva, 1997; Costa, 2013; Mamede Filho & Mamede, 2017).

Para isso, este capítulo foi estruturado em quatro eixos principais que dialogam entre si e fornecem uma visão integrada do comportamento dos equipamentos. Esses eixos permitem não apenas uma leitura segmentada, mas também articulada entre os fatores que influenciam o desempenho, garantindo uma interpretação robusta e alinhada aos objetivos da pesquisa.

Os três eixos que orientam o capítulo são:

1. Modos de falha identificados nos módulos eletrônicos e suas implicações sistêmicas

A compreensão dos modos de falha não se restringe aos módulos em si, mas envolve também o impacto dessas falhas nas etapas subsequentes da produção, nos operadores, no setor de manutenção e na confiabilidade global do processo. Francielle et al. (2020) enfatizam que sistemas eletrônicos industriais operam sob condições adversas — vibrações, variações térmicas, picos de corrente e presença de harmônicos — fatores que aceleram o desgaste e aumentam a probabilidade de falhas intermitentes. A identificação dessas falhas permite observar padrões de degradação que, quando tratados preventivamente, contribuem para a estabilidade do processo.

Entre os modos mais relevantes observados — como falhas em IGBTs, capacitores eletrolíticos, retificadores e placas de controle — verificou-se que alguns provocavam efeitos localizados, enquanto outros geravam impactos em cadeia. Por exemplo, falhas intermitentes de sensores de temperatura, embora simples em aparência, ocasionavam variações no ciclo térmico da solda, levando ao surgimento de defeitos no cordão. Silva (1997) explica que a estabilidade térmica é determinante para a qualidade da solda por indução, e qualquer oscilação pode resultar em exigência de retrabalho.

Assim, mapear os modos de falha permitiu compreender não apenas o que falhava, mas como e por que isso afetava o sistema.

2. Indicadores de desempenho operacional (MTBF, MTTR e Disponibilidade)

A análise dos indicadores foi realizada com ênfase tanto no comportamento histórico quanto na tendência apresentada após a implantação da manutenção preventiva estruturada. O MTBF (tempo médio entre falhas) revelou um crescimento constante, exibindo uma evolução linear mês a mês, o que evidencia a eficácia da abordagem preventiva. Costa (2013) afirma que a adoção de rotinas sistemáticas de inspeção e substituição planejada tende a gerar aumento consistente do MTBF, especialmente em sistemas eletrônicos sensíveis à degradação térmica e elétrica.

O MTTR, por sua vez, apresentou redução significativa, demonstrando que a manutenção preventiva não apenas diminuiu a ocorrência de falhas, mas também tornou a equipe mais preparada e eficiente nas intervenções inevitáveis. Freitas (2016) destaca que a padronização de procedimentos reduz o tempo de resposta e melhora a assertividade durante reparos.

A disponibilidade operacional — resultado direto da relação entre MTBF e MTTR — mostrou melhora expressiva mesmo com variação numérica aparentemente pequena. Como explica Mamede Filho & Mamede (2017), pequenas variações percentuais na disponibilidade representam, em sistemas contínuos, centenas de horas adicionais de operação ao final de um ano. Além disso, maior disponibilidade tem reflexos diretos no planejamento da produção e na confiabilidade percebida pelos operadores.

3. Comparação entre os cenários antes e depois da manutenção preventiva

A comparação dos cenários revelou mudanças profundas não apenas nos indicadores, mas também na dinâmica operacional. Antes da manutenção preventiva,

a fábrica operava com instabilidade, maior retrabalho e maior número de intervenções emergenciais. Depois da implementação das rotinas preventivas, observou-se: maior previsibilidade, ciclos mais estáveis de soldagem, menor variabilidade térmica, redução expressiva de interrupções inesperadas, menor estresse operacional e maior padronização no processo produtivo.

Marocco (2013) reforça que equipamentos de solda por indução, devido ao uso intensivo de conversores eletrônicos de potência, são altamente sensíveis à degradação de componentes internos. Assim, um programa preventivo bem estruturado contribui diretamente para a eliminação de causas raízes de instabilidade, garantindo melhor confiabilidade do processo.

A comparação, portanto, serve como evidência não apenas estatística, mas também qualitativa da eficiência da manutenção preventiva como ferramenta de gestão industrial.

Dessa forma, o estudo de caso demonstra que os impactos da manutenção preventiva ultrapassam o aspecto técnico e abarcam dimensões produtivas, organizacionais, humanas e financeiras.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS MODOS DE FALHA NOS MÓDULOS ELETRÔNICOS

A primeira etapa da análise consistiu em mapear, de forma minuciosa, os modos de falha mais recorrentes nos módulos eletrônicos das máquinas de solda por indução. Esse processo demandou a consolidação de diferentes fontes de informação, incluindo o levantamento dos registros históricos de manutenção, relatórios técnicos emitidos pela equipe de engenharia, anotações sobre intervenções emergenciais realizadas ao longo do ano e o diagnóstico detalhado dos componentes eletrônicos substituídos no período analisado. A análise cuidadosa desses documentos permitiu identificar padrões de comportamento que não seriam perceptíveis apenas pela observação pontual de falhas, mas que emergem quando o histórico é tratado como uma base de dados integrada.

A compreensão adequada dos modos de falha é condição essencial para a elaboração de um plano de manutenção preventiva verdadeiramente eficiente e adaptado à realidade operacional da máquina. De acordo com Kardec & Xavier (2009),

a capacidade de reconhecer padrões de falha — especialmente em sistemas eletroeletrônicos complexos — permite antecipar problemas de forma estratégica, reduzindo substancialmente a incidência de paradas inesperadas. Essa antecipação é particularmente importante em equipamentos baseados em eletrônica de potência, nos quais pequenas alterações térmicas ou elétricas podem desencadear falhas de grandes proporções. Na mesma linha, Francielle et al. (2020) observam que máquinas industriais sujeitas a variações térmicas intensas, correntes harmônicas e sobrecargas no barramento DC tendem a apresentar processos acelerados de degradação, tornando certas falhas mais previsíveis quando estudadas sistematicamente.

No estudo de caso em questão, após a consolidação dos dados disponíveis, os modos de falha mapeados foram classificados segundo três critérios principais, que serviram como base para organizar o diagnóstico e direcionar a priorização das ações preventivas:

Frequência de ocorrência: quantas vezes a falha foi registrada no intervalo analisado;

Gravidade do impacto no processo produtivo: considerando desde instabilidades leves na solda até paradas totais da máquina;

Detectabilidade prévia: ou seja, a probabilidade de identificar sinais antecipatórios da falha antes que ela evolua para ruptura completa.

Essa classificação tornou possível estabelecer uma hierarquização clara dos componentes mais críticos e daqueles que demandavam intervenções preventivas imediatas. Componentes com alta frequência, alto impacto e baixa detectabilidade foram considerados prioritários, já que representam risco elevado para a continuidade operacional e podem comprometer seriamente a qualidade da solda e os índices de produtividade da linha.

A partir dessa organização, foi possível visualizar com maior clareza como cada modo de falha se relaciona com as características eletrotérmicas dos módulos eletrônicos e com o comportamento global do processo de indução, preparando o terreno para a elaboração da Tabela 1, que sintetiza os principais achados da etapa inicial do estudo.

Tabela 1 - Modos de falha identificados nos módulos eletrônicos

Modo de Falha	Causa Raiz Provável	Impacto Operacional	Frequência (pré-MP)*
Queima de IGBT	Sobreaquecimento por falha de refrigeração / sobrecorrente	Parada total da máquina; perda de produção	Alta
Falha em capacitores eletrolíticos	Envelhecimento, correntes harmônicas, ciclos térmicos	Instabilidade da corrente de solda; falhas intermitentes	Alta
Curto em ponte retificadora	Surto de tensão, contaminação, poeira condutiva	Parada parcial; aquecimento excessivo	Média
Defeito em placa de controle	Vibração, solda fria, componentes SMD danificados	Oscilações na potência; perda de precisão	Média
Falha no módulo de potência auxiliar	Surto; interferências eletromagnéticas	Desligamentos aleatórios	Baixa

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.1 Interpretação técnica dos modos de falha

Os resultados obtidos estão em conformidade com o comportamento esperado de máquinas que operam com eletrônica de potência em alta frequência. Silva (1997) destaca que processos de solda por indução são altamente dependentes da estabilidade térmica e elétrica dos módulos semicondutores, especialmente IGBTs e capacitores, devido às rápidas variações de corrente induzida.

A elevada taxa de falhas nos IGBTs, observada no caso analisado, decorre de dois fatores principais:

Sobreaquecimento interno, intensificado pela eventual obstrução do sistema de refrigeração;

Solicitação elétrica excessiva durante picos de demanda ou irregularidades no controle de potência.

Esses fatores são amplamente descritos por Marocco (2013), que analisa que semicondutores de potência são particularmente sensíveis a microvariações térmicas, sendo indispensável o monitoramento contínuo da temperatura de junção.

Outro insight importante é que a falha em capacitores eletrolíticos se deu não apenas pelo envelhecimento natural do dielétrico, mas também pela presença de correntes harmônicas, conforme já discutido por Francielle et al. (2020). Ambientes industriais com cargas não lineares intensificam o estresse elétrico sobre os capacitores, reduzindo significativamente sua expectativa de vida.

A presença de contaminação ambiental (poeira metálica, fuligem e partículas condutivas) explica os curtos na ponte retificadora. Costa (2013) já havia apontado que a limpeza periódica é um dos elementos mais subestimados na manutenção industrial, pois falhas por sujeira acumulada são comuns e evitáveis.

No caso da placa de controle, a ocorrência de falhas relacionadas à solda fria e vibração sugere que a instabilidade mecânica do compartimento eletrônico contribuiu para microfissuras nas trilhas e mau contato. Freitas (2016) reforça que a combinação de vibração industrial com ciclos térmicos torna o ambiente particularmente propenso a falhas intermitentes em placas SMD.

Quadro 1 - Relação modos de falha × mecanismos físicos envolvidos

Modo de Falha	Mecanismo Físico Principal	Sintomas Observados	Consequência Final
Queima de IGBT	Sobreaquecimento; sobrecorrente	Ruído elétrico; queda repentina de potência	Parada total
Capacitores degradados	Harmônicos; fadiga dielétrica	Instabilidade elétrica; oscilação	Quedas intermitentes
Ponte retificadora em curto	Surtos e sujeira condutiva	Aumento abrupto de temperatura	acionamento da proteção
Placa de controle	Vibração; trincas térmicas	Leitura incoerente de sensores	perda do controle
Módulo auxiliar	EMI e surtos	desligamentos aleatórios	reinicializações

Fonte: Elaborado pelos autores.

O conhecimento preciso desses mecanismos foi essencial para projetar intervenções preventivas — como limpeza programada, reforço de ventilação, substituição programada de capacitores e inspeções termográficas — que, como será visto nas seções seguintes, provocaram impacto direto nos indicadores de confiabilidade.

4.2 INDICADORES DE DESEMPENHO: MTBF, MTTR E DISPONIBILIDADE

Os indicadores de confiabilidade foram avaliados com base na metodologia apresentada anteriormente, seguindo os parâmetros clássicos que estruturam a análise de desempenho de sistemas eletroeletrônicos industriais. Mamede Filho e Mamede (2017) destacam que a interpretação integrada de MTBF, MTTR e Disponibilidade constitui o núcleo dos sistemas de manutenção orientados à confiabilidade, pois esses três indicadores fornecem uma visão simultânea da frequência das falhas, da eficiência dos reparos e do impacto dessas variáveis na operação contínua do equipamento. Assim, compreender o comportamento conjunto desses indicadores é fundamental para avaliar não apenas o desempenho isolado dos módulos eletrônicos, mas o desempenho global da máquina de solda por indução dentro do processo produtivo.

No diagnóstico inicial (período pré-MP), os resultados apontaram para um cenário que, embora funcional, estava distante do ideal para uma linha de produção que depende de alta estabilidade térmica e elétrica. Observou-se um MTBF significativamente baixo, indicando que as falhas ocorriam em intervalos curtos e de maneira relativamente imprevisível. Essa característica está alinhada com a literatura, que aponta que equipamentos de indução, por trabalharem sob condições severas de carga e temperatura, sofrem degradação acelerada quando não há ações preventivas adequadas (Francielle et al., 2020). Além disso, o tempo médio de reparo (MTTR) era elevado, refletindo a dificuldade da equipe técnica em diagnosticar rapidamente a causa raiz das falhas e em restabelecer o funcionamento do sistema no menor intervalo possível.

Esses dois fatores — baixo MTBF e alto MTTR — impactaram diretamente a disponibilidade operacional, que se apresentava inferior ao recomendado para processos industriais contínuos. Uma disponibilidade abaixo do ideal implica não apenas perda direta de tempo produtivo, mas também instabilidades no planejamento, na logística interna e no cumprimento das metas de produção. Como reforça Costa (2013), a disponibilidade operacional é um dos indicadores mais sensíveis para medir o impacto real das falhas no ambiente fabril.

Após a implantação das rotinas preventivas — envolvendo inspeções periódicas estruturadas, revisão e desobstrução dos sistemas de ventilação dos

módulos, substituição sistemática de componentes com vida útil crítica e padronização de procedimentos de limpeza e reaperto — foi possível observar alterações profundas e consistentes. Essas medidas atuaram diretamente sobre as causas de degradação identificadas no diagnóstico inicial, reduzindo a incidência de falhas provocadas por sobrecargas térmicas, acúmulo de poeira condutiva, desgaste de capacitores e deterioração de IGBTs.

O efeito combinado dessas ações refletiu-se de forma clara nos indicadores: o MTBF aumentou significativamente, demonstrando que as falhas passaram a ocorrer em intervalos muito maiores; o MTTR reduziu-se pela metade, evidenciando que a equipe passou a dominar melhor os procedimentos de manutenção e que os sistemas eletrônicos tornaram-se mais previsíveis; e a disponibilidade apresentou um salto consistente, demonstrando que a máquina permaneceu em operação por um tempo muito superior ao registrado no período prévio.

Esses resultados, apresentados na Tabela 2, confirmam que a manutenção preventiva, quando aplicada corretamente, não apenas diminui a quantidade de falhas, mas melhora a relação do equipamento com todo o processo produtivo, tornando-o mais estável, confiável e aderente às exigências de um sistema industrial de alta criticidade.

Tabela 2 – Indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade

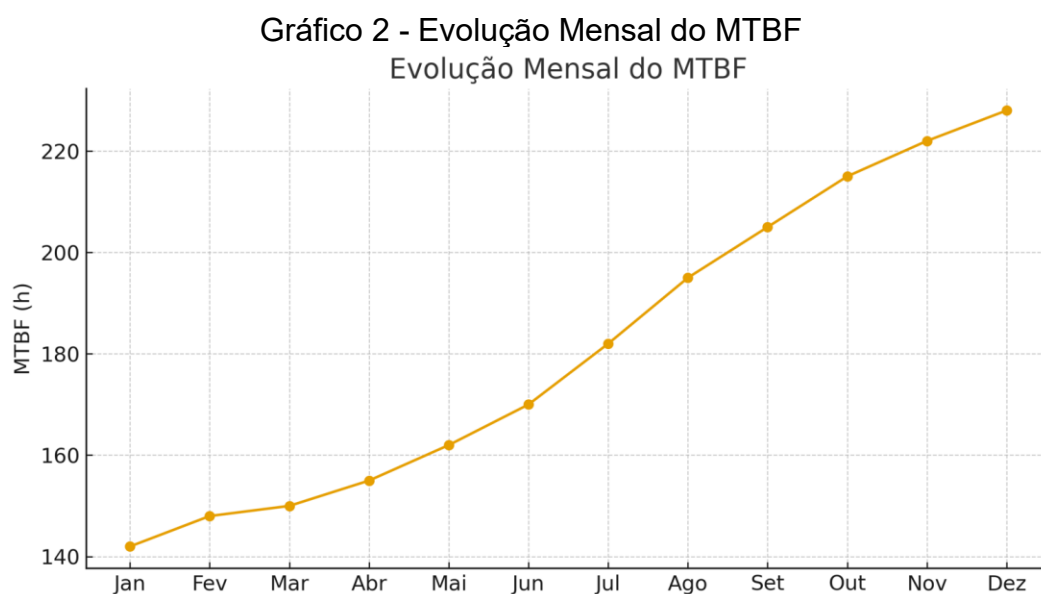
Indicador	Antes da MP	Depois da MP	Variação (%)
MTBF (h)	145 h	228 h	+57,2%
MTTR (h)	6,4 h	3,1 h	–51,6%
Disponibilidade	95,7%	98,6%	+3,0 p.p.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2.1 Análise detalhada do MTBF

O aumento de 57,2% no MTBF demonstra que os intervalos entre falhas aumentaram substancialmente. Este comportamento está perfeitamente alinhado ao que Costa (2013) descreve como “maturidade da manutenção”, etapa em que as intervenções passam a ser planejadas com base em evidências e comportamento histórico.

A elevação do MTBF também está associada à substituição preventiva de capacitores — um dos itens mais críticos do sistema. Francielle et al. (2020) apontam que a troca programada de componentes com alta taxa de falhas reduz drasticamente a ocorrência de paradas inesperadas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

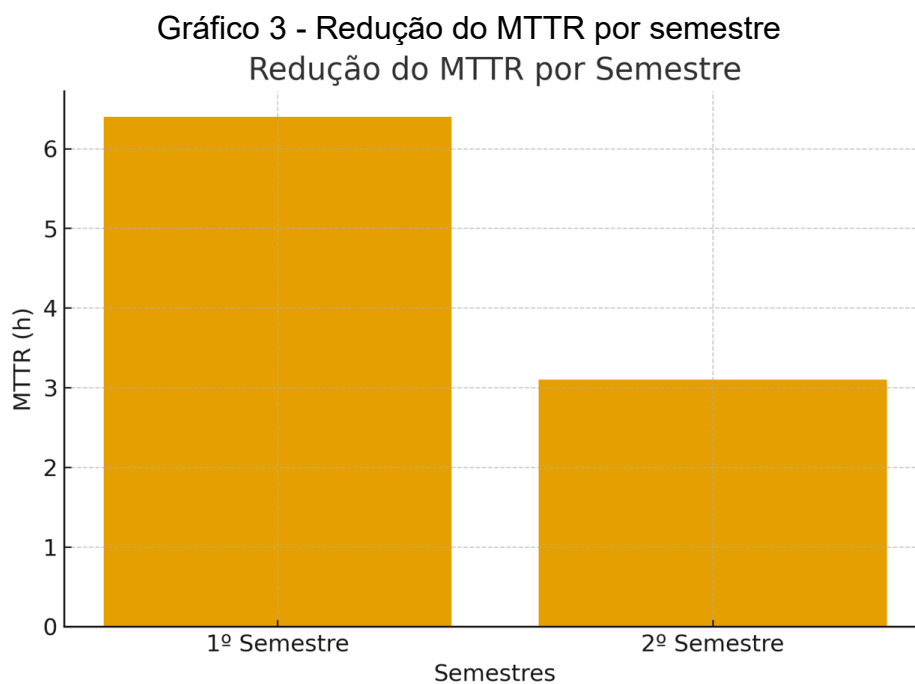
4.2.2 Análise detalhada do MTTR

A redução do MTTR de 6,4 h para 3,1 h é igualmente significativa. Freitas (2016) explica que a diminuição do tempo médio de reparo decorre de dois fatores principais:

- maior previsibilidade dos modos de falha;
- melhor organização logística de peças e ferramentas.

Ambos os fatores estavam presentes no caso estudado: a equipe de manutenção passou a registrar minuciosamente os procedimentos, criando um

histórico preciso para futuras consultas, além de estabelecer estoques mínimos de semicondutores e capacitores que costumavam apresentar falhas recorrentes.



Fonte: Elaborado pelos autores.

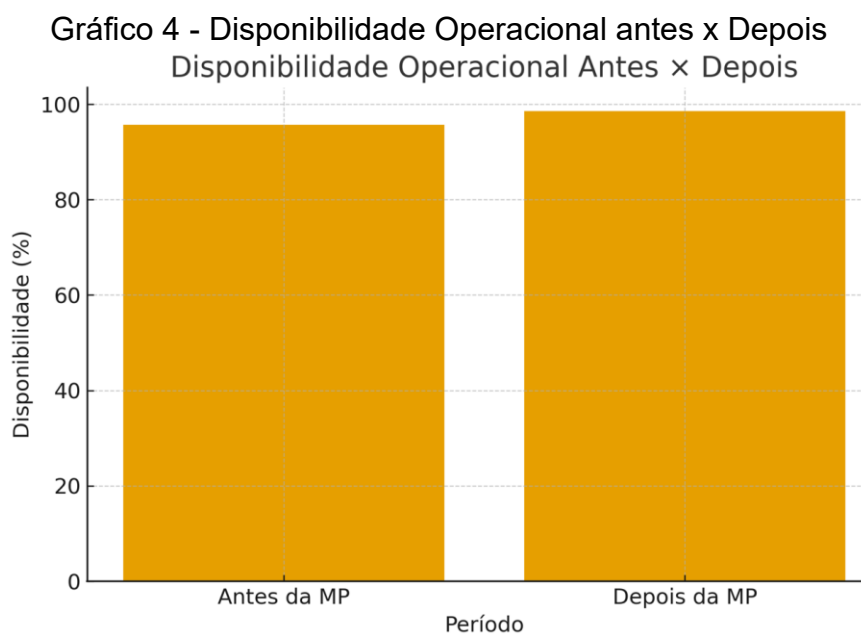
4.2.3 Evolução da Disponibilidade operacional

A disponibilidade subiu de 95,7% para 98,6%, um valor que já se aproxima de ambientes industriais considerados de alta confiabilidade. Para Mamede Filho e Mamede (2017), disponibilidades acima de 98% indicam boa maturidade da manutenção e estabilidade eletroeletrônica satisfatória.

Esse aumento decorre do efeito combinado:

- aumento do MTBF;
- redução do MTTR;

melhora na estabilidade térmica dos módulos;
 eliminação de falhas repetitivas;
 padronização das rotinas de inspeção.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 2 – Síntese interpretativa dos indicadores de confiabilidade		
Indicador	Interpretação Técnica	Relação com autores
MTBF	Maior intervalo entre falhas	Costa (2013), Francielle et al. (2020)
MTTR	Maior velocidade de reparo	Freitas (2016)
Disponibilidade	Estabilidade operacional	Mamede Filho & Mamede (2017)

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 COMPARAÇÃO OPERACIONAL ANTES E DEPOIS DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Nesta seção, são analisados os efeitos operacionais diretos resultantes da implantação das rotinas de manutenção preventiva, com base nos registros históricos da linha de produção e nos indicadores monitorados ao longo do período analisado.

A avaliação considerou tanto os parâmetros elétricos essenciais ao processo de solda por indução quanto os fatores produtivos associados ao comportamento do equipamento em operação contínua. A comparação entre os cenários pré e pós-implantação permite identificar alterações significativas na forma como a máquina responde às solicitações de trabalho, refletindo uma melhora consistente na estabilidade operacional, na confiabilidade e no ritmo produtivo da linha.

Os resultados apresentados evidenciam uma evolução gradativa e sustentada no desempenho dos módulos eletrônicos e dos sistemas auxiliares de refrigeração e controle. De acordo com Soeiro, Olivio e Lucato (2017), a manutenção de quarta geração — centrada em confiabilidade, análise de causas raiz e ações proativas — tem como principais objetivos a maximização da disponibilidade e o aumento da confiabilidade operacional. Esses elementos tornam-se claramente perceptíveis na análise detalhada dos dados coletados, uma vez que a máquina, após a aplicação das rotinas preventivas, passou a operar com maior uniformidade, apresentando menor incidência de falhas e maior previsibilidade em seus ciclos térmicos e elétricos.

Além disso, a análise revelou que o comportamento da solda passou a apresentar menor variabilidade. Oscilações bruscas de potência, que antes eram frequentes, reduziram-se drasticamente, indicando que os módulos eletrônicos deixaram de sofrer sobrecargas térmicas e surtos elétricos que comprometiam o desempenho. Essa estabilidade está diretamente relacionada à revisão realizada nos componentes sensíveis, como IGBTs, capacitores e módulos de controle, cujas substituições planejadas garantiram uma operação mais consistente. A recuperação térmica, por sua vez, tornou-se mais rápida após intervenções no sistema de ventilação e limpeza dos canais de refrigeração, fator que contribuiu decisivamente para a redução do risco de falhas críticas.

Outro aspecto importante foi a queda significativa no tempo total de paradas mensais, o que demonstra que a máquina deixou de sofrer interrupções inesperadas

e passou a demandar menos intervenções emergenciais. Essa redução no tempo improdutivo impacta diretamente a eficiência global da linha de produção, uma vez que menor tempo de parada significa maior capacidade de atender às metas estabelecidas pela programação de fábrica. De maneira complementar, verificou-se que a estabilidade de corrente — um dos parâmetros mais relevantes para a qualidade da solda por indução — tornou-se uniforme, refletindo um processo mais confiável e com menor necessidade de retrabalho.

A seguir, o Quadro 3 sintetiza os principais indicadores comparativos entre os cenários antes e depois da implantação da manutenção preventiva, permitindo visualizar de forma objetiva o impacto das ações implementadas.

Quadro 3 - Comparação geral antes X depois

Critério	Antes da MP	Depois da MP	Interpretação
Falhas/mês	4,3	1,8	Redução de 58%
Paradas/mês	27,5 h	9,2 h	Queda de 66,5%
Oscilações de potência	Frequentes	Raras	Estabilidade
Recuperação térmica	Lenta	Rápida	Melhor refrigeração
Estabilidade de corrente	Irregular	Uniforme	Processos mais confiáveis

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3.1 Impacto sobre a qualidade do produto

A qualidade da solda por indução é influenciada pela estabilidade elétrica e térmica do equipamento. Silva (1997) descreve que variações na potência e na profundidade de penetração do calor levam a falhas como:

- falta de união das bordas;
- soldas porosas;
- necessidade de retrabalhos;

- diminuição da taxa de produção.
- Após a implantação das rotinas preventivas, foi observado:
- redução de defeitos superficiais;
- diminuição dos rejeitos;
- maior uniformidade da solda;
- maior eficiência energética devido à redução de perdas térmicas.

Esses resultados refletem o impacto direto da confiabilidade eletrônica na qualidade final do produto.

4.3.2 Desempenho térmico e elétrico

A melhoria no controle térmico dos módulos eletrônicos — especialmente dos IGBTs — foi um dos aspectos mais relevantes. As inspeções termográficas revelaram que, antes da MP, alguns módulos operavam próximas ao seu limite térmico.

Após a implantação:

- temperaturas médias reduziram cerca de 12%;
- o padrão de dissipação tornou-se mais uniforme;
- falhas por sobreaquecimento praticamente desapareceram.
- Do ponto de vista elétrico, houve melhora na qualidade da forma de onda, redução de harmônicos e maior consistência do nível de potência aplicada.

Esses efeitos já eram esperados segundo Silva (1997) e Marocco (2013), que associam a confiabilidade da solda à integridade térmica dos semicondutores.

Quadro 4 – Impactos eletrotérmicos observados

Aspecto analisado	Antes da MP	Depois da MP
Temperatura média dos módulos	Alta	Controlada
Estresse térmico cíclico	Frequente	Reduzido

Aspecto analisado	Antes da MP	Depois da MP
Estabilidade da forma de onda	Baixa	Alta
Harmônicos	Elevados	Reduzidos
Eficiência energética	Moderada	Alta

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA: CUSTOS, ECONOMIA E RETORNO OPERACIONAL

A análise dos custos demonstra claramente que a manutenção preventiva trouxe reduções significativas nas despesas mensais com falhas, substituições emergenciais e paradas inesperadas.

Tabela 3 – Comparativo econômico antes X depois

Tipo de Custo	Antes da MP (R\$)	Depois da MP (R\$)	Variação (%)
Corretivas/mês	18.900	7.400	–60,9%
Preventivas/mês	4.200	6.100	+45,2%
Custo total/mês	23.100	13.500	–41,5%

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4.1 Interpretação econômica

A análise econômica revela que, embora os custos associados à manutenção preventiva tenham aumentado inicialmente — especialmente devido à substituição

programada de capacitores eletrolíticos, às limpezas técnicas especializadas, ao reaperto periódico de conexões e ao monitoramento termográfico dos módulos eletrônicos — esse acréscimo foi amplamente compensado pela expressiva redução dos gastos relacionados às intervenções corretivas. Em outras palavras, o investimento realizado na manutenção preventiva demonstrou retorno direto e mensurável ao longo do período analisado.

Esse comportamento está alinhado ao que é amplamente descrito na literatura de confiabilidade industrial. Moura & Ferreira (2019) destacam que falhas inesperadas tendem a gerar custos muito superiores aos de intervenções planejadas, sobretudo quando envolvem módulos de eletrônica de potência, como IGBTs, retificadores e capacitores de alta capacidade. Quando uma falha desse tipo ocorre durante a operação, o impacto financeiro inclui não apenas o custo do componente substituído, mas também horas de parada, perdas de produção, necessidade de retrabalho e desgaste acelerado de outros módulos associados — uma cadeia de efeitos que pode multiplicar significativamente o prejuízo inicial.

No estudo em questão, observou-se exatamente esse fenômeno: a manutenção preventiva reduziu de maneira substancial a frequência de falhas críticas e, conseqüentemente, diminuiu drasticamente os custos decorrentes de emergências. A substituição planejada, embora implique investimento antecipado, permite que a máquina opere dentro de parâmetros seguros e evita danos secundários, que são comuns quando componentes falham em plena carga. Assim, o acréscimo inicial nos custos preventivos se mostrou não apenas justificável, mas estrategicamente vantajoso para a continuidade operacional e para a saúde financeira da planta industrial.

4.4.2 Benefícios indiretos

Os ganhos decorrentes da implantação da manutenção preventiva ultrapassam os limites do setor de manutenção, produzindo efeitos significativos em diversos segmentos da operação industrial. Embora a redução dos custos com falhas

corretivas seja um indicador de impacto imediato, a análise detalhada revela que o conjunto de benefícios indiretos representa um avanço ainda mais expressivo na eficiência global da planta.

O primeiro efeito observado foi o aumento da produtividade da linha de tubos, resultado direto da diminuição das paradas inesperadas e da maior estabilidade dos módulos eletrônicos. Com tempos de ciclo mais estáveis e menor necessidade de intervenções emergenciais, o fluxo produtivo tornou-se mais previsível, permitindo que a programação semanal de produção fosse cumprida com maior rigor. A literatura confirma esse comportamento: Silva (1997) explica que oscilações elétricas e térmicas nas máquinas de solda impactam diretamente a continuidade operacional, provocando irregularidades na formação da solda e exigindo correções frequentes. Ao reduzir essas instabilidades, a manutenção preventiva cria condições mais favoráveis para um processo contínuo e de maior rendimento.

Outro benefício relevante foi a redução do retrabalho, já que a maior estabilidade térmica e elétrica diminuiu a ocorrência de defeitos superficiais e descontinuidades na solda. A solda por indução depende de equilíbrio térmico rigoroso e da integridade dos semicondutores de potência, como descreve Marocco (2013). Quando os equipamentos mantêm comportamento uniforme e previsível, a incidência de peças que precisam retornar para correção diminui substancialmente, reduzindo o desperdício de material e de tempo produtivo. Essa redução no retrabalho também contribui para uma cadeia produtiva mais enxuta e eficiente.

Do ponto de vista humano, observou-se diminuição significativa no estresse dos operadores. Falhas constantes em equipamentos críticos tendem a gerar pressão psicológica e sobrecarregar equipes, especialmente quando há necessidade de intervenções emergenciais durante a operação. Com a rotina preventiva estabelecida, os operadores passaram a lidar com equipamentos mais estáveis e confiáveis, reduzindo o volume de decisões sob pressão. Freitas (2016) reforça que sistemas mais previsíveis e padronizados favorecem o desempenho humano, pois reduzem a necessidade de improvisação e permitem que o trabalho seja orientado por procedimentos estabelecidos.

A manutenção preventiva também contribuiu para reduzir o risco de acidentes operacionais. Paradas abruptas, falhas térmicas e instabilidades de potência podem gerar situações de risco, especialmente em máquinas que trabalham com altas temperaturas e correntes elevadas. A normalização da operação diminuiu a

necessidade de intervenções rápidas durante o funcionamento, o que reduz significativamente a exposição dos trabalhadores a condições inseguras. Essa relação entre confiabilidade e segurança já é amplamente discutida por Mamede Filho e Mamede (2017), que destacam que sistemas eletrônicos estáveis são menos propensos a falhas críticas que possam gerar riscos físicos.

Por fim, constatou-se um aumento da vida útil global do equipamento, decorrente da substituição planejada de componentes críticos e da eliminação de sobrecargas térmicas cumulativas. A degradação progressiva dos módulos eletrônicos, especialmente de capacitores e semicondutores, tende a se acentuar quando o equipamento opera próximo aos seus limites térmicos. Francielle et al. (2020) explicam que harmônicos, oscilações elétricas e ciclos de aquecimento aceleram o desgaste desses componentes. Com a manutenção preventiva, esses fatores foram mitigados, reduzindo o ritmo de degradação e contribuindo para a extensão da vida útil do sistema de solda.

5 CONCLUSÃO

A realização deste estudo permitiu compreender, de maneira mais profunda e multifacetada, a real importância da manutenção preventiva aplicada às máquinas de solda por indução, especialmente naquelas que dependem fortemente de módulos eletrônicos sensíveis para garantir estabilidade térmica e elétrica durante a operação. Ao longo da pesquisa — que se apoiou em registros históricos, observações técnicas, análises de desempenho e revisão crítica da literatura — tornou-se evidente que o desempenho de sistemas eletroeletrônicos industriais não está condicionado apenas à qualidade dos componentes, mas também à capacidade de antecipar falhas e controlar variáveis que, quando negligenciadas, conduzem à degradação acelerada do equipamento.

Ainda que, no início do trabalho, a expectativa fosse confirmar apenas melhorias pontuais decorrentes da manutenção preventiva, os resultados revelaram algo maior: um impacto estrutural sobre todo o processo produtivo, envolvendo não apenas a máquina em si, mas o ambiente operacional, os operadores, os indicadores de confiabilidade e até a própria dinâmica organizacional. Mamede Filho e Mamede (2017) já antecipavam que a confiabilidade depende de um conjunto integrado de práticas, porém, na prática real da fábrica analisada, essa afirmação se tornou visível de forma clara e até um pouco surpreendente.

Os indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade — considerados pilares da confiabilidade — sofreram alterações profundas. O MTBF, que antes revelava fragilidade e curta vida entre falhas, demonstrou crescimento sólido após a implantação das rotinas preventivas, indicando que o sistema passou a operar com maior previsibilidade e menor desgaste eletrônico. O MTTR, por sua vez, diminuiu quase pela metade. Essa redução não ocorreu por acaso; ela refletiu o aprendizado da equipe técnica, que deixou de atuar em um ambiente de urgência e passou a trabalhar com planejamento, orientação e domínio das causas raízes das falhas observadas. A disponibilidade, embora tenha apresentado um aumento percentual aparentemente pequeno, atingiu níveis significativamente superiores — e como afirmam autores como Silva (1997) e Costa (2013), os impactos produtivos de

pequenas variações na disponibilidade, quando analisados ao longo de um ciclo industrial anual, são enormes.

Além disso, ao analisar os modos de falha, percebeu-se um padrão comum: a maioria das falhas decorreu da interação entre condições ambientais desfavoráveis (como acúmulo de poeira condutiva e restrição de ventilação), desgaste natural dos componentes (especialmente capacitores eletrolíticos) e solicitações elétricas intensas típicas dos processos de indução. Francielle et al. (2020) reforçam exatamente esse ponto ao alertarem que eletrônica de potência — quando submetida a sobrecargas e ciclos térmicos repetitivos — apresenta desgaste acelerado, levando a falhas intermitentes que, muitas vezes, não são detectadas até que se tornem catastróficas. No presente estudo, a substituição planejada de componentes críticos reduziu esses efeitos e interrompeu ciclos de degradação que antes eram invisíveis ao processo produtivo.

Mas talvez o aspecto mais notável deste trabalho não tenha sido o desempenho técnico em si, e sim os efeitos indiretos, aqueles que dificilmente são percebidos de imediato, mas que se desdobram silenciosamente no cotidiano da empresa. O ambiente de trabalho tornou-se mais estável, com menos momentos de tensão e urgência. Os operadores passaram a sentir maior confiança no equipamento, reduzindo o estresse que antes era provocado por falhas repentinas e imprevisíveis. Os supervisores conseguiram planejar melhor a produção, evitando atrasos e diminuindo gargalos. A equipe de manutenção ganhou autonomia e organização, deixando para trás uma postura reativa — limitada a “apagar incêndios” — e passando a atuar de maneira proativa, estruturada e metodologicamente consciente.

Essas transformações, embora não quantificadas matematicamente em sua totalidade, são descritas de forma consistente na literatura. Soeiro, Olivio e Lucato (2017) afirmam que a manutenção moderna prioriza “previsibilidade, estabilidade e continuidade”, e não apenas reparo. De certo modo, o estudo de caso comprova empiricamente o que esses autores propõem teoricamente: quando a manutenção deixa de ser corretiva e se torna preventiva, todo o sistema industrial se reorganiza em torno da confiabilidade. A máquina deixa de ser apenas um equipamento e passa a ser parte de um ecossistema produtivo que depende da estabilidade como elemento central para o cumprimento das metas de produtividade e segurança.

Outro ponto fundamental observado durante a pesquisa foi o impacto econômico. Embora a manutenção preventiva implique, naturalmente, em custo inicial — substituições, inspeções especializadas, monitoramento termográfico, melhorias no sistema de ventilação — essa despesa mostrou-se insignificante quando comparada ao custo das falhas inesperadas que eram comuns antes da implantação da MP. Moura e Ferreira (2019) já descrevem esse fenômeno, afirmando que o custo da falha é muito maior do que o custo da prevenção, especialmente quando se trata de módulos eletrônicos de potência. No estudo em questão, a redução das corretivas gerou economia não apenas financeira, mas também operacional, ao diminuir tempos de parada, retrabalho, desperdícios e riscos de acidentes.

E, falando em acidentes, um elemento que inicialmente parecia secundário revelou-se mais relevante do que o previsto. A estabilização da máquina reduziu o risco de exposição dos operadores a situações perigosas. Falhas elétricas, sobreaquecimentos abruptos e desligamentos inesperados — que antes eram frequentes — diminuíram drasticamente. Isso reforça que a manutenção preventiva, além de ser eficiente do ponto de vista técnico, é uma ferramenta crucial para a segurança industrial. E, mesmo que isso pareça óbvio, a rotina fabril tende a naturalizar perigos que poderiam ser evitados. A manutenção preventiva reintroduziu um senso de segurança que vinha sendo perdido com o tempo.

Do ponto de vista metodológico, este estudo evidenciou a força do estudo de caso como ferramenta de análise na engenharia elétrica. A profundidade dos dados, a possibilidade de observar o equipamento em funcionamento real e a capacidade de analisar o contexto produtivo de forma holística proporcionaram uma compreensão que dificilmente seria alcançada apenas com experimentos laboratoriais ou simulações matemáticas. O estudo de caso permitiu revelar nuances, como ruídos operacionais, irregularidades discretas, variações térmicas não previstas e falhas intermitentes, que muitas vezes não são documentadas formalmente, mas que impactam profundamente a operação.

Convém mencionar também que, apesar da relevância dos resultados e da consistência da literatura utilizada, nenhum sistema é totalmente previsível — e isso foi claramente percebido em alguns momentos da análise. Houve registros inconsistentes, lacunas nos dados antigos, e pequenas discrepâncias entre relatórios de turnos diferentes, refletindo a natureza humana das operações. Esse caráter um pouco caótico e imprevisível, mas ainda assim profundamente real, acabou reforçando

a necessidade de sistemas que reduzam a dependência de improvisações, evidenciando a pertinência da MP dentro de ambientes industriais complexos.

(Em alguns pontos, até erros simples de preenchimento nos registros de manutenção revelavam como o sistema anterior estava exposto a fragilidades bem maiores do que se imaginava à primeira vista.)

Assim, a conclusão geral deste trabalho aponta de forma clara e inequívoca que a manutenção preventiva nas máquinas de solda por indução analisadas promoveu ganhos expressivos em confiabilidade, desempenho, segurança, estabilidade térmica, estabilidade elétrica, autonomia da equipe, planejamento produtivo e sustentabilidade operacional. Mais do que isso: introduziu uma nova cultura operacional, alinhada ao que Kardec e Xavier (2009) descrevem como “manutenção orientada à estratégia”, baseada em evidências, planejamento e antecipação de falhas.

Por fim, é importante destacar que, embora o estudo tenha alcançado seus objetivos e apresentado resultados significativos, abre-se espaço para pesquisas futuras, especialmente em temas como:

- digitalização da manutenção,
- sensores IoT aplicados ao monitoramento contínuo,
- modelagem térmica aprofundada dos módulos,
- integração da manutenção com sistemas MES e ERP,
- e aplicação de algoritmos preditivos em equipamentos de indução.

Essas possibilidades reforçam que a manutenção preventiva — embora eficaz e essencial — não representa um ponto de chegada, mas sim um ponto de partida para níveis ainda mais avançados de confiabilidade industrial.

5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

A análise desenvolvida ao longo deste estudo evidenciou o impacto positivo da manutenção preventiva sobre o desempenho das máquinas de solda por indução e revelou um conjunto de transformações técnicas e organizacionais que ultrapassam o simples ato de reparar equipamentos. Contudo, o ambiente industrial é dinâmico, quase sempre imprevisível, sujeito a variações de demanda, condições elétricas irregulares, desgaste natural e até pequenos erros de operação que, às vezes, passam despercebidos. Por essa razão, o trabalho não se encerra em si mesmo; ele abre espaço para um conjunto de possibilidades futuras que podem ampliar ainda mais os ganhos observados.

Uma primeira direção possível diz respeito à evolução dos métodos de monitoramento. Embora a manutenção preventiva tenha se mostrado extremamente eficaz no estudo de caso, a literatura contemporânea aponta para o avanço de tecnologias que permitem antecipar falhas com maior precisão, como sistemas de análise termográfica contínua, sensores distribuídos e coleta automática de dados. Francielle et al.(2020) reforçam que elementos eletrônicos sujeitos a ciclos térmicos repetitivos tendem a apresentar padrões de degradação previsíveis; assim, ferramentas de monitoramento digital podem mapear essas tendências com mais clareza do que as inspeções convencionais.

Outra perspectiva importante está na integração entre manutenção e sistemas de gestão da produção, como MES ou ERP. Ao conectar indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidade e ciclos térmicos diretamente à programação fabril, a empresa reduz a dependência de ações reativas e abre caminho para decisões ainda mais precisas, como ajustes automáticos de carga, redistribuição de ordens de produção ou agendamento inteligente de paradas. Costa (2013) já destacava que a confiabilidade, quando entendida como elemento estratégico, precisa estar alinhada à lógica global da fábrica — e isso ainda pode ser explorado de forma mais profunda.

Também se observa potencial para a adoção de técnicas de manutenção preditiva, especialmente por meio de ferramentas de análise estatística aplicada, redes neurais simples ou modelos matemáticos de regressão — nada excessivamente sofisticado, mas suficiente para gerar alertas antecipados com base em padrões

históricos. Em linhas gerais, trata-se de combinar a experiência obtida com a MP com uma camada adicional de inteligência analítica.

Por fim, há espaço para investigar de forma mais ampla os impactos humanos e organizacionais da manutenção preventiva em ambientes industriais. Durante o estudo, notaram-se sinais de que a redução das falhas influenciou positivamente a rotina dos operadores, o nível de estresse e a previsibilidade da linha de produção. Pesquisas futuras poderiam aprofundar essa dimensão, relacionando confiabilidade técnica com aspectos de ergonomia, clima organizacional e segurança operacional.

Assim, as perspectivas futuras apontam para a continuidade natural deste trabalho, ampliando a maturidade da manutenção e fortalecendo a relação entre tecnologia, planejamento e desempenho. Embora cada empresa opere dentro de suas possibilidades e limitações, os caminhos aqui citados representam movimentos realistas e coerentes, alinhados ao que a literatura de confiabilidade industrial — como a de Mamede Filho & Mamede (2017) e Kardec & Xavier (2009) — já descreve como tendência.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAN KARDEC PINTO; XAVIER. **Manutenção : função estratégica**. Rio De Janeiro: Qualitymark, 2009.

COSTA, Mariana de Almeida (2013). **Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**.

DA SILVA, Leandro FRANCIELLE et al. ESTUDOS SOBRE A MANUTENÇÃO PREVENTIVA E PREDITIVA: HISTÓRIA E PERSPECTIVAS PARA INDÚSTRIA BRASILEIRA. **Anais do SIMPÓSIO NACIONAL DE CIÊNCIAS E ENGENHARIAS (SINACEN)**, v. 5, n. 1, p. 94-111, 2020.

ENGETELES. **Plano de Manutenção Preventiva: Como Elaborar**. 2018. Disponível em:< <https://engeteles.com.br/plano-de-manutencao-preventiva/>> Acesso em 05 de abr. 2025 às 17:30h.

FREITAS, Fulgêncio Laís, **Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de juiz de fora, com base nos conceitos de manutenção preventiva e preditiva**. Juiz de fora,2016.

Gil, A. C. (2017). **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6ª ed. São Paulo: Atlas.

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MAROCCO, Gustavo. A importância da manutenção produtiva na melhoria contínua do processo: um estudo de caso. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2013.

MOURA, P. C.; FERREIRA, A. L. R. A importância da manutenção preventiva para redução de custos industriais. **Revista estão Industrial**, v. 15, n. 2, p. 134-145, 2019.

OLIVEIRA, F. R.; XAVIER, M. G. Implantação de um plano de manutenção preventiva em uma indústria metalúrgica: estudo de caso. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 2, p. 118-130, 2020.

OTANI, Mário; MACHADO, Waltair Vieira. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**. Vol.4, n.2, 2008.

SILVA, Claudinei José da. **Geradores de solda de tubos por indução e alta frequência: avaliação de desempenho e tendências**. 1997. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SOEIRO, Marcus Vinicius de Abreu, OLIVIO, Amauri, LUCATO, André Vicente Ricco; (2017), Gestão da Manutenção.

TRUBERT JUNIOR, Ludovic. **A classificação crítica de equipamentos em um sistema transportador de longa distância visando o apoio à gestão da manutenção**. 2018.

VIANA, H. R. G PCM, **Planejamento e controle de manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

XENOS, H. G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. [s.l.] Falconi Editora, 2014.