www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v.30, n.164, 2026 | DOI: 10.69849/zttw9a58

Análise de falhas elétricas da onduladeira e impacto na produção

Analysis of electrical failures in the corrugator and impact on production

AIgor Rocha de Andrade[1]
Layse Oliveira Batista (Orientação)
Izaque Francisco da Costa (Coorientação)

Resumo

Este estudo analisa falhas elétricas típicas em onduladeiras e seus impactos sobre a continuidade e o desempenho produtivo. Trata-se de pesquisa aplicada, descritiva e bibliográfica, de abordagem qualitativa, estruturada a partir de princípios de análise de modos de falha e efeitos (FMEA/FMECA). A onduladeira foi decomposta em subsistemas funcionais, permitindo relacionar acionamentos, motores, inversores, encoders, sensores, fontes de 24 Vcc, CLPs, redes industriais e sistemas de segurança aos respectivos modos de falha, sintomas e consequências. Os resultados indicam que falhas em alimentação elétrica, acionamentos, realimentação e comunicação podem provocar paradas totais, redução de velocidade, perda de sincronismo, geração de refugo e aumento do tempo de recuperação. Foram propostos indicadores como tempo de parada, MTBF, MTTR, disponibilidade, perda teórica de produção e reincidência, além de ações preventivas e preditivas orientadas à criticidade. Conclui-se que o registro estruturado de ocorrências, a análise de causa raiz e o monitoramento de condição favorecem a redução de recorrências e a transição de uma manutenção reativa para uma gestão orientada à confiabilidade e ao desempenho produtivo.

Palavras-chave: Confiabilidade; Falhas elétricas; Manutenção; Onduladeira; Produção.

Abstract

This study analyzes typical electrical failures in corrugating machines and their impacts on production continuity and performance. It is an applied, descriptive and bibliographic study with a qualitative approach, structured according to failure mode and effects analysis (FMEA/FMECA) principles. The corrugator was divided into functional subsystems, allowing drives, motors, frequency inverters, encoders, sensors, 24 Vdc power supplies, PLCs, industrial networks and safety systems to be related to their respective failure modes, symptoms and consequences. The results indicate that failures in electrical supply, drives, feedback and communication can cause complete stops, speed reduction, loss of synchronization, scrap generation and increased recovery time. Indicators such as downtime, MTBF, MTTR, availability, theoretical production loss and recurrence were proposed, together with preventive and predictive actions oriented by criticality. It is concluded that structured occurrence records, root cause analysis and

[1] Centro Universitário Fametro (FAMETRO) – Manaus – Amazonas – Brasil. E-mail: igorrocha633@gmail.com.

condition monitoring favor the reduction of recurrence and the transition from reactive maintenance to reliability- and production-performance-oriented management.
Keywords: Corrugator; Electrical failures; Maintenance; Production; Reliability.

1 INTRODUÇÃO

O setor de embalagens de papelão ondulado depende de linhas produtivas com elevada continuidade e sincronismo entre diferentes módulos. A onduladeira transforma bobinas de papel em chapas de papelão por meio de alimentação, ondulação do miolo, aplicação de adesivo, união com capas, aquecimento, tração e corte. Ferreira, Camargo e Araujo (2020) descrevem a onduladeira como uma máquina multiestágio central no processo de fabricação e destacam que as paradas desse equipamento representam perda de produtividade e aumento de custos.

Em linhas modernas, o funcionamento mecânico está fortemente associado aos sistemas elétricos e eletrônicos. Motores, inversores de frequência, servoacionamentos, sensores, encoders, CLPs, módulos de entrada e saída, fontes de 24 Vcc, redes industriais, contatores, relés de segurança e dispositivos de proteção atuam de forma coordenada. Consequentemente, uma falha elétrica localizada pode produzir um efeito sistêmico, interrompendo o transporte do papel, quebrando o sincronismo ou acionando uma parada de segurança.

Falhas em máquinas elétricas e sistemas de acionamento são objeto recorrente de estudos de manutenção porque podem causar interrupções não planejadas, perda de produção e danos secundários. Kudelina et al. (2021) destacam que o monitoramento de condição e o diagnóstico precoce são relevantes para a confiabilidade de máquinas elétricas. Manuais de inversores industriais também demonstram que proteções de sobrecorrente, sobretensão, subtensão, sobretemperatura, falhas de ventilação e perda de sinais de realimentação podem desabilitar o acionamento para evitar danos (WEG, 2018; WEG, 2026).

Na onduladeira, o impacto de uma falha não se limita ao tempo entre parada e reparo. A linha pode exigir descarte do material presente no equipamento, limpeza, reposicionamento de papel, reaquecimento, reconfiguração de referências e nova estabilização de velocidade e qualidade. Além disso, uma parada pode alterar a sequência planejada, atrasar ordens e aumentar o volume de retrabalho. Assim, avaliar falhas elétricas requer associar a causa técnica ao efeito produtivo.

O objetivo geral deste trabalho é analisar falhas elétricas típicas em uma onduladeira e discutir seus impactos sobre a produção. Como objetivos específicos, pretende-se: identificar subsistemas elétricos críticos; classificar modos de falha e sintomas; relacionar falhas a paradas, redução de velocidade e refugo; propor indicadores de confiabilidade; e apresentar ações de manutenção capazes de reduzir recorrência e tempo de recuperação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Funcionamento da onduladeira como sistema integrado

A produção de papelão ondulado combina transformação do papel e movimentação contínua em uma sequência coordenada. Em uma configuração típica, diferentes bobinas alimentam as camadas do produto; o papel destinado ao miolo passa pelo conjunto de rolos corrugadores, recebe adesivo e é unido à capa. Em linhas de parede dupla, etapas adicionais são incorporadas. Após a formação, a manta passa por aquecimento e tração, sendo posteriormente cortada conforme o programa de produção. Ferreira, Camargo e Araujo (2020) demonstram que decisões e paradas na onduladeira afetam diretamente custos e fluxo produtivo.

O caráter contínuo da linha faz com que os acionamentos precisem manter relações de velocidade e torque compatíveis. Um motor que para abruptamente, um encoder que perde pulsos ou um inversor que entra em falha pode provocar diferença de velocidade entre seções, tensionamento inadequado do papel, enrugamento, ruptura, descolamento ou parada coordenada. Por essa razão, a análise de falhas deve considerar a lógica de causa e efeito entre o componente e a função de processo, e não apenas a condição física do dispositivo.

2.2 Falhas em motores e acionamentos elétricos

Motores elétricos industriais estão sujeitos a falhas de origem elétrica e mecânica, como desequilíbrio de tensão, sobrecarga, aquecimento, problemas de isolamento, conexões deficientes, defeitos em rolamentos e anomalias de rotor. Kudelina et al. (2021) apresentam diferentes métodos de monitoramento aplicáveis a máquinas elétricas, incluindo análise de corrente, vibração, temperatura e grandezas elétricas. A identificação precoce de tendências anormais permite programar intervenções antes de uma parada completa. A literatura de diagnóstico de máquinas elétricas ressalta a utilidade de métodos complementares para identificar falhas incipientes (NANDI;

TOLIYAT; LI, 2005; HENAO et al., 2014). A IEC 60034-1:2026 estabelece requisitos gerais de desempenho para máquinas rotativas, enquanto a IEC 60034-18-41:2014 aborda sistemas de isolamento sujeitos à alimentação por conversores.

Nos inversores de frequência, a atuação das proteções constitui simultaneamente um mecanismo de segurança do equipamento e uma causa imediata de indisponibilidade da função acionada. Condições como sobrecorrente, sobretensão no barramento CC, subtensão, sobretemperatura, falha de ventilação, curto-circuito e erros de sensores de velocidade podem gerar bloqueio do inversor. O manual WEG CFW701 lista categorias desse tipo e exemplifica a importância de diagnosticar a causa antes de simplesmente rearmar a falha (WEG, 2018). A compatibilidade eletromagnética dos sistemas de acionamento é tratada pela IEC 61800-3:2022, devendo os códigos de falha e os parâmetros do equipamento ser interpretados em conjunto com a documentação do fabricante (WEG, 2018; WEG, 2026).

Falhas recorrentes de sobrecorrente podem estar associadas a aceleração excessivamente rápida, travamento mecânico, sobrecarga, curto na saída ou parametrização inadequada. Subtensão pode resultar de afundamentos da rede, conexões com alta resistência ou problemas de alimentação. Sobretemperatura pode indicar ventilação insuficiente, filtros obstruídos, temperatura ambiente elevada ou sobrecarga. Portanto, o código exibido pelo acionamento deve ser tratado como ponto de partida da investigação, e não como diagnóstico final.

2.3 Sensores, encoders, fontes e sistemas de controle

Sensores e encoders formam a base da realimentação utilizada para sincronismo, posicionamento e proteção. Uma falha de cabeamento, conector, alimentação, alinhamento ou parametrização pode gerar leitura incoerente sem que o componente mecânico principal esteja danificado. Em acionamentos com realimentação de velocidade, o próprio fabricante associa falhas de sensor a problemas de fiação, montagem, comprimento de cabo ou configuração de pulsos (WEG, 2026). Em uma onduladeira, isso pode resultar em perda de sincronismo ou parada preventiva.

As fontes de 24 Vcc e os circuitos de controle também são pontos críticos porque alimentam CLPs, sensores, relés e módulos de entrada e saída. Uma falha nessa alimentação pode derrubar simultaneamente vários dispositivos, produzindo múltiplos alarmes e dificultando o diagnóstico. Conexões frouxas, oxidação, bornes aquecidos e vibração podem gerar falhas intermitentes, particularmente difíceis de reproduzir. Por

isso, inspeções de aperto, termografia e verificação de qualidade de energia podem complementar a manutenção convencional.

As intervenções elétricas precisam observar os requisitos da NR-10, enquanto a manutenção e a segurança de máquinas devem estar alinhadas à NR-12. Esses requisitos incluem medidas de prevenção, qualificação dos trabalhadores, documentação, proteção contra acionamento inesperado e integridade dos sistemas de segurança (BRASIL, 2019; BRASIL, 2024). A confiabilidade produtiva não deve ser obtida por supressão de intertravamentos ou bypass de proteções. Como referências complementares de segurança, a ISO 12100:2010 orienta avaliação e redução de riscos, e a IEC 60204-1:2016 trata dos requisitos gerais para equipamentos elétricos de máquinas.

2.4 Confiabilidade, manutenção e impacto produtivo

A análise de confiabilidade utiliza indicadores que ajudam a transformar registros de manutenção em informação de gestão. O MTBF representa o tempo médio entre falhas reparáveis, enquanto o MTTR representa o tempo médio de reparo. Uma aproximação da disponibilidade intrínseca pode ser calculada por $A = MTBF/(MTBF + MTTR)$. A redução do MTTR é especialmente relevante em linhas contínuas, pois falhas inevitáveis podem ter impacto menor quando diagnóstico, acesso, sobressalentes e procedimentos de recuperação são eficientes.

Além da disponibilidade, o impacto pode ser convertido em perda de produção. Se a taxa média de produção da onduladeira for P toneladas por hora e o tempo de parada não planejada for t horas, a perda teórica bruta pode ser estimada por $L = P \times t$. A perda real tende a ser maior quando se acrescentam refugos gerados no instante da falha e na retomada, energia consumida sem produção útil, horas de manutenção, reprogramação e atrasos logísticos. A literatura de produção em fábricas de caixas já reconhece que paradas e balanceamento da linha interferem diretamente na capacidade e no desempenho (SAVSAR; COGUN, 1994). No contexto específico do papelão ondulado, estudos de Ferreira, Camargo e Araujo (2020) e de Savsar e Cogun (1994) evidenciam a relevância das paradas e do planejamento da linha para custos e capacidade produtiva.

2.5 Qualidade de energia e condições do ambiente elétrico

A confiabilidade de uma onduladeira não depende apenas do estado individual dos motores, sensores e inversores. A qualidade da alimentação elétrica influencia simultaneamente diferentes subsistemas e pode produzir sintomas que se confundem com defeitos locais. Variações de tensão, desequilíbrio entre fases, conexões de potência

deterioradas, afundamentos momentâneos e problemas de aterramento podem ocasionar atuações de proteção, aquecimento e falhas intermitentes. Em linhas com grande quantidade de acionamentos eletrônicos, a análise deve considerar também o ambiente eletromagnético e a forma como cabos de potência, comando e comunicação foram instalados. Para a caracterização objetiva da qualidade da energia, a IEC 61000-4-30:2025 define métodos de medição, enquanto a IEEE 519-2022 apresenta limites e práticas relacionadas a distorções harmônicas em sistemas elétricos.

O desequilíbrio de tensão merece atenção porque pequenas assimetrias na alimentação podem resultar em correntes desequilibradas e elevação térmica nos motores. Em um processo contínuo, o aumento de temperatura pode não gerar parada imediata, mas contribui para envelhecimento do isolamento e redução da margem operacional. Da mesma forma, quedas de tensão de curta duração podem provocar desligamento de fontes ou drives, principalmente quando os circuitos possuem sensibilidades distintas. Nesses casos, substituir repetidamente um componente sem verificar a alimentação pode tratar apenas o efeito e manter a causa sistêmica ativa.

Os inversores de frequência, por sua natureza eletrônica, também interagem com o sistema elétrico e com a instalação. Parametrização de rampas, limites de corrente, frenagem, frequência de chaveamento e proteção térmica deve ser compatível com a carga acionada. Manuais de fabricantes como a WEG (2018) mostram que os códigos de falha fornecem informações valiosas sobre sobrecorrente, subtensão, sobretensão, sobretemperatura e problemas de realimentação. O histórico desses eventos deve ser preservado, pois a sequência de alarmes anterior à parada frequentemente oferece pistas mais úteis que o último alarme visualizado após o reset.

A condição física dos painéis interfere diretamente na confiabilidade. Temperatura interna elevada, ventiladores obstruídos, filtros saturados, poeira condutiva, umidade e bornes frouxos criam ambientes favoráveis a falhas. Por essa razão, a análise elétrica deve combinar medições com inspeções periódicas e registro das condições encontradas. Uma falha classificada genericamente como “drive” pode, na realidade, ter origem em ventilação insuficiente ou alimentação deficiente; a classificação correta é importante para que a ação preventiva seja direcionada à causa e não apenas ao componente substituído.

2.6 Manutenção baseada em condição e diagnóstico de falhas

A manutenção preditiva e a manutenção baseada em condição buscam identificar degradação antes da falha funcional. Mobley (2002) destaca que técnicas de monitoramento devem ser escolhidas conforme os modos de falha dominantes e o impacto do ativo no processo. Para motores e acionamentos de uma onduladeira, a estratégia pode combinar inspeção termográfica, medições elétricas, análise de vibração, avaliação de isolamento, tendências de corrente e leitura de parâmetros dos inversores. Nenhuma técnica isolada detecta todos os mecanismos de falha; o maior valor surge da correlação entre diferentes evidências. A estruturação de programas de monitoramento é coerente com a ISO 17359:2018 e com os princípios de gestão do ciclo de vida de ativos apresentados na ISO 55000:2024.

A termografia pode indicar aquecimento anormal em conexões, contatores, disjuntores, cabos e componentes de painel, desde que a inspeção seja realizada sob condições de carga conhecidas. A análise de corrente pode revelar desequilíbrios, sobrecarga e determinadas anomalias associadas ao motor ou à carga. Ensaios de isolamento, quando aplicáveis e executados com o equipamento devidamente isolado, apoiam a avaliação do estado dielétrico. Kudelina et al. (2021) apresentam diferentes métodos de monitoramento e detecção de falhas em máquinas elétricas, reforçando que a tendência histórica é mais informativa do que uma única medição sem referência. A aplicação dessas técnicas pode ser apoiada pela ISO 18434-1:2008, para termografia, e pela ISO 20816-1:2016, para medição e avaliação de vibração de máquinas.

Nos sistemas de automação, o diagnóstico precisa incluir sensores, encoders, redes e fontes de alimentação. A falha intermitente de um encoder pode aparecer apenas em determinada velocidade ou condição térmica, enquanto um conector pode perder continuidade com vibração. O registro de eventos do CLP, da IHM e dos drives deve, quando possível, preservar horário, código, estado do equipamento e variáveis relevantes. A existência de uma linha do tempo facilita distinguir causa primária de alarmes secundários que surgem após a parada coordenada da máquina.

A abordagem de manutenção centrada em confiabilidade proposta por Moubray (1997) orienta a seleção das tarefas com base nas funções do ativo, nas falhas funcionais, nos modos de falha e nas consequências. Aplicada à onduladeira, essa lógica evita planos genéricos de manutenção. Um sensor barato, mas capaz de interromper toda a linha e com falha difícil de diagnosticar, pode merecer inspeção e sobressalente prioritário. Em contrapartida, componentes redundantes ou de rápida substituição podem exigir

estratégia diferente. A criticidade, portanto, deve refletir o efeito real sobre segurança, produção, qualidade e tempo de recuperação.

2.7 METODOLOGIA

A pesquisa é classificada como aplicada, descritiva e bibliográfica, com abordagem qualitativa orientada à análise de falhas. A estrutura metodológica utiliza princípios de análise de modos de falha e efeitos para relacionar componente, causa provável, sintoma, consequência no processo, método de detecção e ação recomendada. Não foram atribuídos dados históricos específicos de uma empresa, a fim de evitar a criação de resultados inexistentes; os modos de falha são apresentados como categorias técnicas típicas que devem ser confrontadas com os registros reais da onduladeira analisada. A organização dos modos de falha segue a lógica da IEC 60812:2018 para FMEA/FMECA; quando necessário, relações causais podem ser aprofundadas por análise de árvore de falhas conforme a IEC 61025:2006.

Inicialmente, a onduladeira foi dividida em subsistemas funcionais: alimentação e desenrolamento; acionamentos de rolos corrugadores e tração; aquecimento e colagem; corte e sincronismo; painéis e alimentação elétrica; automação e redes. Em seguida, foram identificados elementos elétricos críticos e seus possíveis modos de falha. A terceira etapa relacionou cada falha a efeitos de produção, distinguindo parada total, redução de velocidade, perda de sincronismo, geração de refugo e risco de repetição.

Para uma aplicação prática futura, recomenda-se coletar para cada ocorrência: data e hora, módulo afetado, código de falha, estado anterior da máquina, velocidade, produto em fabricação, tempo até diagnóstico, tempo até retorno, componente substituído, causa confirmada e quantidade de refugo. Esses registros permitem calcular MTBF, MTTR, disponibilidade, distribuição de Pareto por causa e perda de produção associada. A Tabela 1 sintetiza os subsistemas elétricos relevantes para a análise. A Figura 1 representa o encadeamento entre falha elétrica e impacto produtivo.

Tabela 1 – Subsistemas elétricos relevantes em uma onduladeira

Subsistema	Principais componentes	Função no processo
Acionamentos	Motores, inversores, contatores, disjuntores	Movimentação, tração e sincronismo
Medição e realimentação	Encoders, sensores indutivos/ fotoelétricos, transdutores	Velocidade, posição, presença e permissivos
Controle	CLP, módulos de I/O, IHMs, relés	Sequenciamento, lógica e alarmes
Alimentação de controle	Fontes 24 Vcc, transformadores, UPS quando aplicável	Energia para automação e instrumentação

Comunicação	Redes industriais e cabos de dados	Troca de referências e estados entre módulos
Segurança	Relés/CLPs de segurança, E-stops, chaves de proteção	Parada segura e prevenção de movimento perigoso

Fonte: elaboração própria (2026).

Figura 1 – Encadeamento entre falha elétrica e impacto produtivo



Fonte: elaboração própria (2026).

2.8 Critérios de classificação das ocorrências e priorização

Para tornar a análise reproduzível, as ocorrências devem ser classificadas por subsistema, componente, modo de falha, causa confirmada ou provável e consequência produtiva. Um registro apenas com a descrição “falha elétrica” não permite identificar recorrência. O mesmo vale para registros que utilizam somente o nome do componente trocado, porque a substituição não comprova que aquele elemento era a causa raiz. Recomenda-se separar o sintoma observado, o diagnóstico realizado e a ação corretiva executada. Essa estrutura favorece comparações entre turnos e reduz a dependência da memória dos profissionais.

A priorização pode utilizar uma pontuação simples de frequência, duração e impacto. Frequência representa quantas vezes o modo de falha ocorre; duração corresponde ao tempo médio ou total de indisponibilidade; e impacto considera a extensão da perda produtiva, de qualidade ou de segurança. A combinação desses fatores permite distinguir falhas frequentes de curta duração, que podem representar grande perda acumulada, de falhas raras mas severas, que exigem plano de contingência. A matriz não substitui técnicas formais de confiabilidade, mas organiza os dados iniciais para direcionar a investigação.

Quando houver dados suficientes, a análise de Pareto deve ser conduzida sobre minutos de parada e não apenas sobre número de ocorrências. Essa escolha evita que

pequenas falhas repetitivas dominem a contagem enquanto eventos menos frequentes, porém muito longos, permaneçam subestimados. Em paralelo, o tempo de diagnóstico e o tempo de reparo podem ser registrados separadamente. Se o diagnóstico representar parcela elevada do MTTR, investimentos em documentação, alarmes e instrumentos de teste podem produzir mais resultado que simplesmente aumentar o estoque de peças.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modos de falha e efeitos produtivos

A análise funcional mostra que falhas em diferentes componentes podem produzir sintomas semelhantes. Uma parada de um motor, por exemplo, pode ter origem em sobrecarga mecânica, atuação do inversor, perda de fase, subtensão, falha no circuito de comando ou intertravamento proveniente de outro módulo. Essa característica torna inadequado substituir componentes com base apenas no sintoma. O diagnóstico deve seguir a cadeia de permissivos e verificar o primeiro evento registrado no histórico de alarmes.

Falhas em acionamentos de seções de tração tendem a possuir alto impacto porque o restante da linha precisa desacelerar ou parar de forma coordenada. Perdas de sinal de encoder podem gerar parada imediata para evitar diferença de velocidade. Em sensores de presença ou posicionamento, o efeito pode variar de uma interrupção breve até falhas intermitentes que reduzem a capacidade operacional e exigem sucessivos rearmes. Já problemas na alimentação de 24 Vcc ou no CLP podem afetar vários dispositivos ao mesmo tempo, elevando a criticidade.

Em termos produtivos, a consequência mais visível é o tempo de parada. Entretanto, a produção perdida inclui também a fase de recuperação. Quando a manta de papel fica inutilizada dentro da linha, pode ser necessário remover material, reposicionar bobinas, limpar áreas de colagem e restabelecer temperatura e tensão. Assim, dois eventos com o mesmo tempo de reparo podem gerar perdas muito diferentes dependendo do momento, da velocidade e do produto que estava sendo fabricado. A Tabela 2 apresenta os modos de falha, sintomas e impactos identificados.

Tabela 2 – Falhas elétricas típicas, sintomas e impactos

Falha ou condição	Sintoma provável	Impacto na produção	Verificação recomendada
Sobrecorrente em inversor	Trip durante aceleração ou carga	Parada de seção ou da linha	Carga mecânica, rampas, corrente, curto e parametrização
Subtensão / afundamento	Falhas simultâneas ou desarme de drive	Parada não programada e perda de sequência	Tensão de entrada, conexões, rede e registros
Sobretemperatura do drive	Alarme térmico e bloqueio	Redução de velocidade ou parada	Ventilação, filtros, ventiladores e carga
Perda de encoder	Velocidade incoerente ou erro de realimentação	Perda de sincronismo e parada segura	Cabo, conector, alimentação, montagem e pulsos
Sensor intermitente	Alarmes aleatórios / ausência de peça ou papel	Microparadas, refugo e baixa eficiência	Alinhamento, sujeira, vibração e cabo
Fonte 24 Vcc instável	Múltiplas entradas e dispositivos falham	Parada ampla e diagnóstico complexo	Tensão, ripple, carga, terminais e fonte
Falha de comunicação	Módulos sem troca de dados	Parada coordenada ou modo degradado	Cabos, conectores, switches, terminadores e logs
Conexão frouxa / aquecimento	Falha intermitente, queda de tensão	Paradas reincidentes e risco de dano	Inspeção, torque, termografia e sinais de carbonização

Fonte: elaboração própria (2026).

3.2 Priorização qualitativa de manutenção

Em uma matriz qualitativa, a prioridade pode ser estabelecida combinando frequência, impacto e detectabilidade. Falhas de fonte de controle, drive principal ou rede que interrompam toda a linha possuem impacto elevado mesmo quando pouco frequentes. Sensores de baixo custo podem ter impacto individual menor, mas sua repetição pode acumular tempo de microparadas significativo. Dessa forma, a decisão de manutenção não deve considerar apenas o preço do componente.

O histórico de falhas deve ser analisado por Pareto, identificando quais famílias respondem pela maior parcela do tempo perdido. Em seguida, as causas reincidentes devem passar por análise de causa raiz. Se a mesma falha de encoder ocorre repetidamente e a substituição do sensor produz apenas melhoria temporária, a investigação deve considerar cabo, blindagem, aterramento, vibração, alinhamento, suporte mecânico ou parametrização. Esse raciocínio evita manutenção baseada em troca sucessiva de peças. A Tabela 3 organiza a priorização qualitativa dos grupos de falhas.

Tabela 3 – Priorização qualitativa dos principais grupos de falha

Grupo	Impacto potencial	Frequência típica a verificar	Prioridade de gestão
Alimentação elétrica e 24 Vcc	Muito alto: pode afetar vários módulos	Determinar por histórico e qualidade de energia	Muito alta
Inversores e motores de tração	Muito alto: perda de movimento/sincronismo	Determinar por alarmes e condição	Muito alta
Encoders e realimentação	Alto: parada segura ou perda de sincronismo	Verificar recorrência e ambiente	Alta
Sensores de processo	Médio a alto: microparadas e refugo	Frequentemente dependente de sujeira/alinhamento	Alta quando reincidente
Rede industrial	Alto: perda de comunicação entre módulos	Analisar eventos e topologia	Alta
Elementos de comando locais	Variável: de função isolada a parada	Verificar desgaste e aquecimento	Média/alta conforme criticidade

Fonte: elaboração própria (2026).

3.3 Indicadores para mensurar o impacto na produção

O primeiro indicador deve ser o tempo de parada não programada por categoria de falha. Somente contabilizar o número de ocorrências pode gerar interpretação incorreta, pois dez microparadas de um minuto têm efeito diferente de uma única falha de duas horas. O segundo indicador é o MTTR, útil para revelar dificuldades de diagnóstico, acesso, falta de sobressalente ou necessidade de procedimentos mais claros. O terceiro é o MTBF, que mostra a tendência de recorrência de um equipamento ou sistema.

A disponibilidade pode ser calculada para cada ativo crítico, e a perda estimada de produção pode ser associada ao tempo de parada. Entretanto, a taxa nominal da onduladeira não deve ser utilizada de forma indiscriminada. O ideal é empregar a taxa real média do produto que estava em fabricação no momento do evento. Além disso, devem ser registrados refugo de partida, material descartado devido à falha e tempo de estabilização após o retorno.

Uma análise gerencial mais completa pode incorporar o componente de disponibilidade do OEE, ainda que a aplicação do indicador exija padronização consistente dos tempos planejados, paradas e velocidades. O valor do método está em permitir que manutenção e produção utilizem a mesma linguagem quantitativa para priorizar ações. Uma falha elétrica de baixo custo pode justificar investimento significativo se for responsável por grande parcela das horas perdidas. A Tabela 4 reúne os indicadores de confiabilidade e desempenho.

Tabela 4 – Indicadores sugeridos para análise das falhas

Indicador	Expressão / registro	Interpretação
Tempo de parada	Soma das horas de indisponibilidade por causa	Mede impacto direto de cada família de falha
MTBF	Tempo operacional / número de falhas	Quanto maior, menor a recorrência
MTTR	Tempo total de reparo / número de reparos	Quanto menor, mais rápida a recuperação
Disponibilidade	MTBF / (MTBF + MTTR)	Proporção de tempo potencialmente disponível
Perda teórica de produção	Taxa média × tempo de parada	Converte indisponibilidade em volume não produzido
Refugo associado	Material descartado no evento e retomada	Captura perdas além do tempo parado
Reincidência	Falhas repetidas da mesma causa/ componente	Evidencia necessidade de causa raiz

Fonte: elaboração própria (2026).

3.4 Estratégias para redução de falhas e do tempo de recuperação

A manutenção preventiva deve incluir inspeção de ventilação e filtros dos painéis, limpeza técnica, reaperto conforme procedimento, verificação de cabos e conectores, inspeção de componentes submetidos a vibração e acompanhamento de temperatura em pontos críticos. Em motores e acionamentos, tendências de corrente, temperatura e vibração podem auxiliar na identificação de degradação. Kudelina et al. (2021) apontam que a combinação de diferentes técnicas de monitoramento amplia a capacidade de diagnóstico.

Para falhas intermitentes, o registro automático de eventos é essencial. O histórico do CLP, da IHM e dos inversores deve preservar o primeiro alarme e, quando possível, grandezas associadas ao momento da ocorrência. A simples prática de rearmar até a máquina voltar a funcionar elimina evidências e favorece a reincidência. Procedimentos de diagnóstico devem definir uma sequência de verificação baseada no código de falha, estado dos permissivos e medições elétricas.

A gestão de sobressalentes deve priorizar componentes cujo tempo de reposição seja incompatível com a criticidade do processo. Fontes de alimentação, sensores específicos, módulos de I/O, ventiladores de drive, encoders e dispositivos de comunicação podem exigir estoque mínimo conforme histórico e lead time. Isso não significa estocar indiscriminadamente, mas classificar peças segundo impacto, frequência e disponibilidade no mercado.

Finalmente, intervenções devem manter a integridade das proteções. A NR-10 e a NR-12 reforçam a necessidade de controle dos riscos elétricos e de segurança de máquinas. A retirada de intertravamentos para evitar paradas pode reduzir momentaneamente a indisponibilidade aparente, mas aumenta riscos a pessoas, equipamentos e qualidade. A meta correta é eliminar a causa que aciona a proteção de forma indevida ou recorrente, preservando sua função de segurança.

3.5 Análise de causa raiz e prevenção de recorrências

A eliminação de recorrências exige que a investigação avance além do reset do equipamento ou da troca imediata da peça. Após uma parada relevante, recomenda-se reconstruir a sequência de eventos, identificar o primeiro alarme, verificar as condições de carga e consultar intervenções recentes. Ferramentas como os cinco porquês podem ser utilizadas quando existe uma cadeia causal relativamente simples, enquanto diagramas de causa e efeito ajudam a organizar hipóteses relacionadas a máquina, método, material, ambiente e mão de obra. O resultado deve apontar uma causa tecnicamente sustentada e uma ação que reduza a probabilidade de repetição.

Em falhas intermitentes, é necessário evitar conclusões baseadas apenas no desaparecimento temporário do sintoma. Um conector reapertado, por exemplo, pode restaurar o funcionamento, mas a investigação deve verificar vibração, esforço mecânico no cabo, oxidação e qualidade da terminação. De forma semelhante, a substituição de um inversor pode interromper a falha por algum tempo mesmo que a causa real esteja em sobrecarga ou ventilação inadequada. A disciplina de registrar evidências antes da intervenção aumenta a qualidade do diagnóstico e permite comparar ocorrências futuras.

As ações de causa raiz podem envolver modificação técnica, mudança de parâmetro, revisão de procedimento, melhoria de inspeção, treinamento ou alteração no estoque de sobressalentes. A eficácia deve ser verificada após um período definido, comparando a recorrência e o tempo de parada com o histórico anterior. Uma ação não deve ser encerrada apenas porque foi implementada; precisa demonstrar que o modo de falha foi reduzido ou que sua consequência passou a ser controlada.

3.6 Plano de manutenção preventiva e preditiva orientado à criticidade

Um plano orientado à criticidade concentra esforço nos pontos cuja falha afeta a continuidade da onduladeira. Para painéis e acionamentos, a rotina pode incluir inspeção de limpeza, ventilação, temperatura, conexões e histórico de alarmes. Para motores, devem ser observadas corrente, temperatura, ruído, vibração, condição de cabos e

proteção. Encoders e sensores exigem inspeção de fixação, alinhamento, conectores e qualidade do sinal, enquanto fontes de 24 Vcc devem ser avaliadas quanto a tensão sob carga, aquecimento e margem de capacidade.

A periodicidade deve ser ajustada a partir do histórico. Equipamentos submetidos a poeira, calor ou vibração podem necessitar inspeções mais curtas que componentes instalados em ambientes favoráveis. Da mesma forma, um componente que apresentou duas falhas relacionadas ao mesmo mecanismo em poucos meses merece revisão do intervalo preventivo. Esse ajuste dinâmico está alinhado à lógica de manutenção baseada em confiabilidade, na qual a tarefa e sua frequência precisam ser justificadas pelo modo de falha e pela consequência (MOUBRAY, 1997).

A manutenção preditiva deve produzir tendências, e não apenas relatórios isolados. Uma temperatura medida sem referência de carga e sem comparação histórica tem valor limitado. O mesmo ocorre com vibração ou corrente. Recomenda-se criar pontos de medição padronizados, registrar o regime da máquina e estabelecer limites de atenção com base no comportamento normal e nas recomendações técnicas. Ao identificar tendência de degradação, a intervenção pode ser planejada em janela de manutenção, reduzindo o risco de parada não programada. A Tabela 5 apresenta o plano proposto de manutenção preventiva e preditiva.

Tabela 5 – Plano de manutenção preventiva e preditiva orientado à criticidade

Elemento	Atividade	Periodicidade sugerida	Registro
Painéis e inversores	Limpeza, ventilação, verificação de temperatura e alarmes	Mensal (conforme ambiente)	Checklist, termogramas
Motores críticos	Medição de corrente, temperatura, vibração e conexões	Mensal	Tendência de medições
Encoders e sensores	Inspeção de fixação, alinhamento, cabos e conectores	Mensal	Ocorrências observadas
Fontes 24 Vcc	Verificação de tensão sob carga, aquecimento e conexões	Trimestral	Valor medido e observações
Rede, CLP e IHM	Verificação de comunicação e backups	Mensal	Logs, erros de comunicação
Cabos e bornes críticos	Inspeção visual e reaperto conforme procedimento	Parada programada	Ordem de serviço

Fonte: elaboração própria (2026).

3.7 Quantificação do impacto produtivo e análise de cenários

A quantificação do impacto deve separar perda direta de produção, tempo de recuperação e refugo. Para uma aproximação inicial, a produção não realizada pode ser estimada pelo produto entre taxa média de produção e tempo de indisponibilidade. Entretanto, esse cálculo deve ser corrigido quando a linha opera abaixo da capacidade

nominal ou quando o produto em fabricação possui velocidade específica. O uso de uma taxa média por família de produto tende a representar melhor a perda do que a utilização indiscriminada da velocidade máxima da máquina.

Considere, apenas como cenário didático, uma linha que produza em média 8 toneladas por hora sob determinada condição e sofra uma parada elétrica de 45 minutos. A perda bruta potencial seria 6 toneladas, antes de considerar ramp-up, descarte e restrições posteriores. Se mais 15 minutos forem necessários para estabilização e retorno à taxa normal, o impacto efetivo se aproxima de uma hora. O exemplo demonstra por que o tempo registrado no alarme não deve ser o único indicador; a recuperação do processo precisa ser incorporada quando afeta a entrega de produto conforme.

Outro indicador relevante é a disponibilidade A = MTBF/(MTBF + MTTR). A expressão mostra que a disponibilidade pode ser aumentada tanto pela redução da frequência das falhas quanto pela redução do tempo para reparar. Em uma onduladeira, algumas ações de baixo custo atuam principalmente sobre o MTTR: identificação padronizada de cabos, diagramas atualizados, acesso ao histórico de alarmes, sobressalentes críticos disponíveis e procedimentos de diagnóstico. Outras ações, como correção de ventilação, proteção de cabos e manutenção baseada em condição, buscam elevar o MTBF.

O impacto financeiro pode incluir custo do material descartado, energia consumida sem produto conforme, horas extras, atraso de entrega e mobilização de manutenção. Nem todos esses elementos precisam ser convertidos em moeda em uma primeira etapa. O essencial é criar uma base de dados consistente que permita demonstrar quais grupos de falhas consomem mais tempo produtivo. A partir dessa informação, a empresa pode priorizar investimentos com maior relação entre esforço e redução de perdas. A Tabela 6 exemplifica os registros necessários para estimar perdas produtivas.

Tabela 6 – Estrutura de registro para estimar perdas por falha elétrica

Campo	Finalidade
Início e fim da parada	Calcular indisponibilidade
Tempo de diagnóstico	Identificar oportunidade de reduzir MTTR
Tempo de reparo e retomada	Medir recuperação completa da linha
Taxa média do produto	Converter parada em produção potencial não realizada
Refugo gerado	Mensurar efeito adicional da parada
Código/primeiro alarme	Relacionar ocorrência ao modo de falha
Causa e ação corretiva	Permitir análise de recorrência e eficácia

Fonte: elaboração própria (2026).

3.8 Roteiro de implementação para gestão das falhas elétricas

A implementação pode ser dividida em quatro fases. Na primeira, padroniza-se o registro das falhas e a identificação dos ativos. Na segunda, consolida-se um período de dados e aplica-se Pareto sobre os minutos de parada. Na terceira, os modos de falha prioritários recebem análise de causa raiz e plano de ação. Na quarta, os resultados são verificados por indicadores de recorrência, MTBF, MTTR e disponibilidade. Essa sequência evita iniciar pela compra de tecnologia sem conhecer quais problemas realmente dominam as perdas.

A governança do processo deve envolver produção, manutenção elétrica, manutenção mecânica e automação. Em uma onduladeira, o sintoma elétrico pode ser provocado por causa mecânica, e a parada mecânica pode gerar alarmes elétricos secundários. Reuniões curtas e periódicas de revisão das principais ocorrências ajudam a compartilhar evidências e evitam classificações isoladas. A equipe de produção contribui com o contexto anterior à falha, enquanto a manutenção registra medições, diagnóstico e reparo.

Por fim, a gestão de conhecimento deve acompanhar a gestão de falhas. Diagramas, backups, listas de parâmetros, procedimentos de substituição e registros de causa raiz precisam permanecer acessíveis e atualizados. Quanto maior a dependência de conhecimento tácito de uma única pessoa, maior tende a ser o tempo de diagnóstico quando essa pessoa não está disponível. A padronização documental, associada ao treinamento e à análise sistemática dos dados, transforma a manutenção de uma postura predominantemente reativa em uma atuação progressivamente preventiva e orientada à confiabilidade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise evidencia que as falhas elétricas de uma onduladeira possuem efeito direto sobre a continuidade do processo e podem provocar perdas superiores ao tempo estritamente utilizado no reparo. A integração entre acionamentos, sensores, controle e sistemas de segurança faz com que falhas locais se propaguem pela linha, exigindo uma abordagem sistêmica de diagnóstico.

Os grupos de maior criticidade tendem a envolver alimentação elétrica, fontes de controle, inversores, motores de tração, encoders e redes de comunicação. Entretanto, componentes simples, como sensores e conexões, podem gerar impacto expressivo quando apresentam comportamento intermitente. Por isso, a prioridade de manutenção

deve ser definida com base em impacto acumulado, recorrência, detectabilidade e tempo de recuperação, e não somente pelo custo unitário da peça.

Recomenda-se implantar registro estruturado de falhas, cálculo de MTBF e MTTR, análise de Pareto, monitoramento de condição nos ativos críticos e revisão periódica dos sobressalentes. Com dados históricos confiáveis, a empresa poderá quantificar a perda por categoria de falha e direcionar investimentos para as causas que mais reduzem disponibilidade. Dessa forma, a manutenção elétrica passa de uma atuação predominantemente reativa para uma função orientada à confiabilidade e ao desempenho produtivo.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Centro Universitário Fametro (FAMETRO) pelo suporte à formação acadêmica e ao desenvolvimento deste estudo; à orientadora, Prof.ª Esp. Layse Oliveira Batista, pelas orientações e contribuições; e ao coorientador Izaque Francisco da Costa pelo apoio na revisão técnica. Estende os agradecimentos aos docentes e profissionais que contribuíram para o aprimoramento dos conhecimentos em Engenharia Elétrica e manutenção industrial.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 10 (NR-10): segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília, DF: MTE, texto vigente em
2026. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-10-nr-10. Acesso em: 17 ago. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12): segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília, DF: MTE, texto vigente em
2026. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-12-nr-12. Acesso em: 17 ago. 2026.

FERREIRA, Marcelo Gitirana Gomes; CAMARGO, Victor Claudio Bento; ARAUJO, Silvio Alexandre de. The reel allocation problem of a corrugated packaging company. **Pesquisa Operacional**, v. 40, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0101-7438.2020.040.00229708. Acesso em: 17 ago. 2026.

HENAO, Humberto et al. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, n. 2, p. 31-42, 2014. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6839118. Acesso em: 17 ago. 2026.

IEEE. **IEEE 519-2022: IEEE standard for harmonic control in electric power systems**. Piscataway: IEEE, 2022. Disponível em: https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60034-1:2026:**
Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance. Geneva: IEC, 2026. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/89961. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60034-18-41:2014: Rotating electrical machines - Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters**. Geneva: IEC, 2014. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/118. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60204-1:2016:**
Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements.
Geneva: IEC, 2016. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/26037. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60812:2018: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)**. Geneva: IEC, 2018. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/26359. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61000-4-30:2025: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods**. Geneva: IEC, 2025. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/71611. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61025:2006: Fault tree analysis (FTA)**. Geneva: IEC, 2006. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/4311. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61800-3:2022:**
Adjustable speed electrical power drive systems - Part 3: EMC requirements and specific test methods for PDS and machine tools. Geneva: IEC, 2022. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/65056. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 12100:2010: Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction**. Geneva: ISO, 2010. Disponível em: https://www.iso.org/standard/51528.html. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17359:2018: Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines**. Geneva: ISO, 2018. Disponível em: https://www.iso.org/standard/71194.html. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 18434-1:2008: Condition monitoring and diagnostics of machines - Thermography - Part 1: General procedures**. Geneva: ISO, 2008. Disponível em: https://www.iso.org/standard/41648.html. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 20816-1:2016: Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines**. Geneva: ISO, 2016. Disponível em: https://www.iso.org/standard/63180.html. Acesso em: 17 ago. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 55000:2024: Asset management - Vocabulary, overview and principles**. Geneva: ISO, 2024. Disponível em: https://www.iso.org/standard/83053.html. Acesso em: 17 ago. 2026.

KUDELINA, Karolina; ASAD, Bilal; VAIMANN, Toomas; RASSÕLKIN, Anton; KALLASTE, Ants; KHANG, Huynh Van. Methods of condition monitoring and fault detection for electrical machines. **Energies**, v. 14, n. 22, 7459, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/en14227459. Acesso em: 17 ago. 2026.

MOBLEY, R. Keith. **An introduction to predictive maintenance**. 2. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002. Disponível em: https://shop.elsevier.com/books/an-introduction-to-predictive-maintenance/mobley/978-0-7506-7531-4. Acesso em: 17 ago. 2026.

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997. Disponível em: https://books.industrialpress.com/9780831131463/reliability-centered-maintenance/. Acesso em: 17 ago. 2026.

NANDI, Subhasis; TOLIYAT, Hamid A.; LI, Xiaodong. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors: a review. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20,
n. 4, p. 719-729, 2005. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/1546063/. Acesso em: 17 ago. 2026.

SAVSAR, Mehmet; COGUN, Can. Analysis and modelling of a production line in a corrugated box factory. **International Journal of Production Research**, v. 32, n. 7, p. 15711589, 1994. DOI: https://doi.org/10.1080/00207549408957023. Acesso em: 17 ago. 2026.

WEG. **CFW701 frequency inverter: programming manual**. Jaraguá do Sul: WEG, 2018. Documento 10001461481/02. Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h41/h6d/WEG-CFW701-programming-manual-10001461481-2.0x-en.pdf. Acesso em: 17 ago. 2026.

WEG. **MVW01 frequency inverter: programming manual**. Jaraguá do Sul: WEG, 2026.

Documento 10013258572, revisão 02. Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h74/h8f/WEG-MVW01-programming-manual-10013258572-en.pdf. Acesso em: 17 ago. 2026.