

Capítulo IV – Monitoramento Inteligente da Repetição de Padrões em Processos de Laminação de Embalagens Flexíveis com Leitura em Alta Frequência

Fabio Oswaldo de Souza Koyano Filho ¹⁰

Wesley Candido Silva ¹¹

Renato Kazuo Miyamoto ¹²

Rodolfo Alexandre Hildebrandt¹³

RESUMO

Este trabalho examina o processo de laminação em embalagens flexíveis, focando na implementação de um sistema que monitora fatores críticos que afetam a qualidade final do produto, especificamente as variações do passo de fotocélula. O estudo visa validar a implementação de um sistema eletrônico, demonstrando seus benefícios para a indústria de embalagens plásticas. A abordagem metodológica combina revisão de literatura, validação prática do sistema e análise dos resultados, considerando ganhos em produtividade e confiabilidade do processo. Os resultados indicam que a implementação desse sistema impacta diretamente o desempenho e a produtividade da linha da empresa parceira e permite uma nova metodologia, contribuindo para a redução de defeitos e otimização do desempenho em análises.

Palavras-chave: Processo de Laminação, Embalagens Flexíveis, Controle de Passo de Fotocélula, Produtividade, Capabilidade de Processo.

Intelligent Monitoring of Pattern Repetition in Flexible Packaging Lamination Processes Using High-Frequency Reading

ABSTRACT

This study examines the lamination process in flexible packaging, focusing on the implementation of a system that monitors critical factors affecting the final product quality, specifically variations in the photocell step. The research aims to validate the implementation of an electronic system, demonstrating its benefits for the plastic packaging industry. The methodological approach combines a literature review, practical system implementation, and result analysis, considering gains in productivity and process reliability. The results indicate that the system implementation directly impacts the performance and productivity of the partner company's production line and enables a new methodology, contributing to defect reduction and performance optimization in analysis processes.

Keywords: Lamination process. Flexible packaging. Photocell step control. Productivity. Process capability.

¹⁰ Engenheiro Eletricista. UniSenaiPR - Campus Londrina.

¹¹ Especialista. UniSenaiPR - Campus Londrina, wesley.candido@sistemafiep.org.br

¹² Doutor em Engenharia Elétrica. UniSenaiPR - Campus Londrina, renato.miyamoto@sistemafiep.org.br

¹³ Doutor em Eng. Mecânica. UniSenaiPR - Campus Londrina. rodolfo.hildebrandt@sistemafiep.org.br

1 INTRODUÇÃO

As embalagens desempenham um papel crucial em nossas vidas cotidianas, trazendo a simples função de proteção e armazenamento. Desde os primeiros vestígios da civilização humana, a necessidade de preservar alimentos e objetos valiosos evoluiu para o desenvolvimento de embalagens inovadoras, permitindo a comercialização eficiente de uma ampla gama de produtos.

Atualmente, as embalagens são verdadeiras vitrines, refletindo a identidade de marcas e produtos, influenciando nossas escolhas de consumo e impactando o cenário global de negócios. A organização global Two Sides realizou uma pesquisa em 2019 sobre como a embalagem influencia na decisão de compra dos brasileiros. O resultado mostrou que 64% dos consumidores se preocupam com a capacidade de proteção, 52% com as informações e 74% com a facilidade de abrir e fechá-la.

Segundo relatório divulgado pela Mordor Intelligence, as expectativas para a indústria de embalagens no país são notavelmente positivas. O setor está projetado para alcançar uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 3,2% até o ano de 2026. Entretanto, uma pesquisa realizada pela Maxiquim com exclusividade para a ABIEF, as embalagens plásticas flexíveis presenciaram um acréscimo de 1,3% em seu volume de produção durante o ano de 2022, contudo o faturamento registrou uma queda de 8,5%. “Os números evidenciam a realidade de nossa indústria: temos produzido mais, com menor rentabilidade”, comenta o Presidente da ABIEF, empresário Rogério Mani.

O processo de fabricação de embalagens flexíveis é uma intersecção complexa entre tecnologia, engenharia e criatividade. Cada etapa desse processo, moldada pelas particularidades de diferentes concepções e tecnologias, é vital para a produção eficiente e a qualidade do produto final. Embora o processo seja cuidadosamente projetado para ser preciso e consistente, a natureza multifacetada da produção também traz consigo uma série de variáveis e desafios resultando em variações constantes de parâmetros de produção. Sendo estes, traduzidos em perdas e impactos financeiros consideráveis.

Atualmente, em um ambiente industrial altamente competitivo e automatizado, a precisão nos processos produtivos é um fator determinante para a qualidade final do produto. Em particular, na indústria de embalagens flexíveis, onde pequenas

variações no tamanho da embalagem podem gerar desperdícios ou falhas no produto final, a confiabilidade do processo de leitura e controle desse dimensional é essencial.

Há um consenso entre empresas de consultoria e autores como Hart e Bogan (1994) e Paladini (1995) de que o processo de implantação de sistemas de qualidade começa com o conhecimento preciso da realidade da empresa. Para isso, a confiabilidade dos dados gerados e monitorados é crucial para uma gestão eficaz. No contexto da indústria de embalagens, essa confiabilidade depende de sistemas que garantam a leitura precisa e o controle em alta frequência devido a velocidade em que é produzido os filmes flexíveis.

Nesse contexto, este trabalho visa abordar os desafios supracitados por meio da implementação de um sistema que possibilitará um monitoramento do dimensional da embalagens por meio da leitura da marcação de passo de foto célula durante o processo de laminação, destinado a otimizar o processo de produção e a confiabilidade desta característica fundamental para as fabricas de envase.

O passo de foto célula trata-se de uma marcação lateral na embalagem que tem como objetivo posicionar a separação das artes impressas, possibilitando o corte e envase do material nas indústrias de envase. Este projeto busca não somente identificar variações indesejadas, mas também contribuir para o desenvolvimento contínuo da indústria de embalagens, alinhando-se ao cenário previsto para o setor no cenário nacional.

O sistema de leitura de repetições em alta frequência proposto visa melhorar significativamente o controle e monitoramento da qualidade durante o processo produtivo. Com a utilização de dois sensores ópticos e a integração com um encoder incremental, o sistema permite a leitura contínua das marcações de fotocélula ao longo de toda a bobina produzida, eliminando a necessidade de medições manuais após a saída de cada bobina da máquina.

Além disso, o monitoramento em tempo real das marcações proporcionará maior confiabilidade ao processo produtivo, já que permitirá a identificação precoce de variações indesejadas. Esse sistema também traz a vantagem de garantir que toda a extensão da bobina, com usualmente mais de 9 km de comprimento, seja monitorada continuamente, ao contrário do método atual, em que apenas a camada final da bobina é medida. Assim, não apenas o processo será otimizado, mas também

será possível reduzir significativamente o desperdício de material e os custos operacionais, resultando em uma produção mais eficiente e precisa.

A estrutura deste trabalho será dividida em tópicos que abordarão, inicialmente, os conceitos e fundamentos teóricos sobre as embalagens e suas características em seguida, serão descritos os métodos e as etapas de implementação do sistema de leitura de repetições e por fim, serão apresentadas as análises dos resultados obtidos com a implementação, seguidas das conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Gorni (2003), o plástico, membro da família dos polímeros, é um dos materiais mais populares. Os polímeros, são compostos por macromoléculas formadas pela repetição de uma unidade básica conhecida como mero e podem ser classificados de várias maneiras, sendo a classificação com base em características mecânicas uma das mais importantes. Gorni divide os polímeros em termoplásticos, termorrígidos (termofixos) e elastômeros (borrachas). Quanto às propriedades mecânicas dos plásticos termoplásticos, o autor destaca que essas propriedades variam conforme o plástico e podem se manifestar como maleáveis, rígidas ou mesmo frágeis em temperatura ambiente.

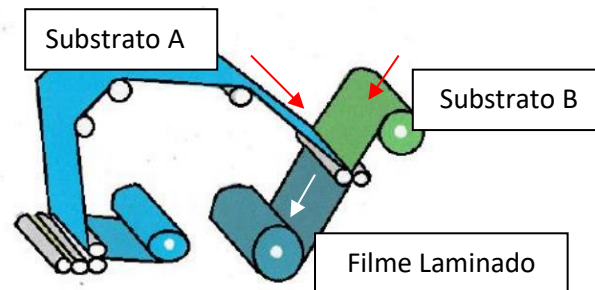
De acordo com Callister e Rethwisch (2013), um polímero pode se comportar como um vidro em temperaturas muito baixas, como uma borracha em temperaturas intermediárias (acima da temperatura vítrea) e como um líquido viscoso em temperaturas muito altas.

1.1. EMBALAGENS LAMINADAS

Conforme pontuado pelo Livro Embalagens Flexíveis (Instituto de Embalagens, 2016) a laminação, nos processos de fabricação de embalagens flexíveis, é um procedimento essencial que envolve a junção de diferentes materiais com base em uma série de informações técnicas criteriosas que o produto final deve proporcionar,

essas informações abrangem o tipo de produto a ser envasado, a vida útil desejada e a resistência química e térmica da estrutura laminada.

Figura 26 - Representação resumida de laminação

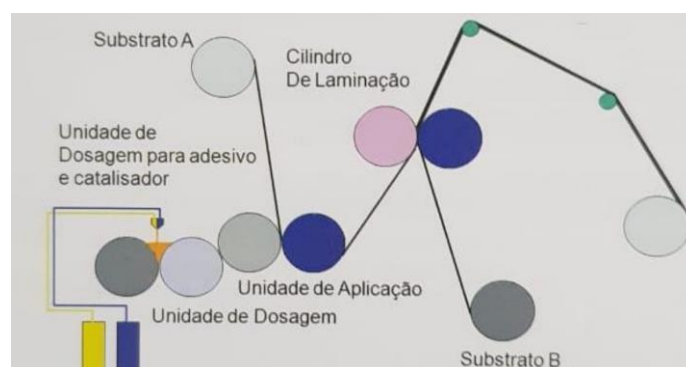


Fonte: Adaptado - Huanaco Choquehuanca, 2014.

Esse processo é uma estratégia valiosa para agregar valor às embalagens, aprimorar questões estéticas, reforçar as propriedades de barreira, proteger a impressão, facilitar o processo de envase, garantir resistência à delaminação, otimizar o processo de vedação, influenciar a apresentação no ponto de venda, atender a requisitos legais e reduzir custos (Silveira, 2015).

De acordo com Fabiana, os parâmetros de processo essenciais na laminação incluem tensões, pressões, a proporção de aplicação da mistura adesiva, gramatura e temperaturas. É crucial que os operadores estejam cientes da necessidade de ajustar esses parâmetros de acordo com a estrutura específica de laminação. A variação da temperatura no Nip Roll (Cilindro de Laminação) desempenha um papel relevante no que diz respeito à distribuição do adesivo, ao brilho do laminado, bem como à qualidade final da bobina. (Silveira, 2015).

Figura 27 - Processo de laminação simplificado



Fonte: Embalagens Flexíveis, 2009.

1.2. UTILIZAÇÃO DO PET EM EMBALAGENS FLEXÍVEIS

O poli(tereftalato de etileno) (PET), popularmente conhecido como poliéster, desempenha um papel significativo nas indústrias de embalagens (Rodrigues, 2018). Esse material é amplamente utilizado em embalagens rígidas, como garrafas e frascos, além de filmes biorientados, devido às suas notáveis propriedades. Entre elas, destacam-se a elevada resistência mecânica, o brilho e a transparência (Rodrigues, 2018).

A temperatura de transição vítrea (T_g) desse material é um fator importante a ser considerado. A T_g representa a temperatura na qual as moléculas de um polímero passam de um estado quase imóvel para um estado *borrachoso*, tornando-se mais facilmente deformáveis por cisalhamento (Manrich, 2005). De acordo com Robertson (1993), a T_g do PET é de 69°C.

O emprego do PET na indústria de embalagens é notavelmente comum, abrangendo uma ampla gama de aplicações. Conforme ressaltado por Dantas e Lima (2007), o PET usualmente é utilizado na produção de filmes biorientados destinados a embalagens flexíveis laminadas. Podendo atingir diversas características conforme a necessidade do cliente final.

O Livro Embalagens Flexíveis de Blucher (2009), destaca que a laminação compreende a união de um filme fino, transparente, de polipropileno (PP), poliéster, acetato ou nylon com a superfície de folha de impressão ou outro substrato.

1.3. VARIAÇÕES PRESENTES NO PROCESSO PRODUTIVO

Conforme observado por Sarantópoulos et al. (2002), na análise final de embalagens plásticas flexíveis, é notável que o aspecto visual das embalagens pode ser afetado por diversos fatores, incluindo a qualidade da formação após a fase de acabamento, que desempenha um papel essencial na sua performance tanto do ponto de vista químico quanto físico, abrangendo aspectos como resistência e aparência.

Durante o processo produtivo, é importante ressaltar que existe a possibilidade de ocorrer desvios em relação ao padrão de qualidade devido a potenciais defeitos, frequentemente associados à necessidade de ajustes precisos nas máquinas. Esses

problemas específicos podem surgir no decorrer do processo de fabricação das embalagens, muitas vezes como resultado de interrupções temporárias no fornecimento de material às máquinas ressalta o autor.

Figura 28 - Exemplos de defeitos ocasionados por variação de passo de fotocélula



Fonte: modenapak embalagem, 2016.

Também podemos relacionar os desvios de qualidade do produto final com os parâmetros de processos aplicados durante a produção, pois, os substratos utilizados na fabricação dessas embalagens flexíveis são extremamente sensíveis e dinâmicos. Ou seja, uma tensão e/ou temperatura excessiva nos substratos a serem laminados pode acarretar mínimas variações das estruturas de um polímero ocasionando pequenas alterações em dimensões do material e por sua vez trazendo variações no passo de fotocélula, resultando instabilidade para as máquinas de envase.

1.4. APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTOS PARA CONTROLE DO PROCESSO

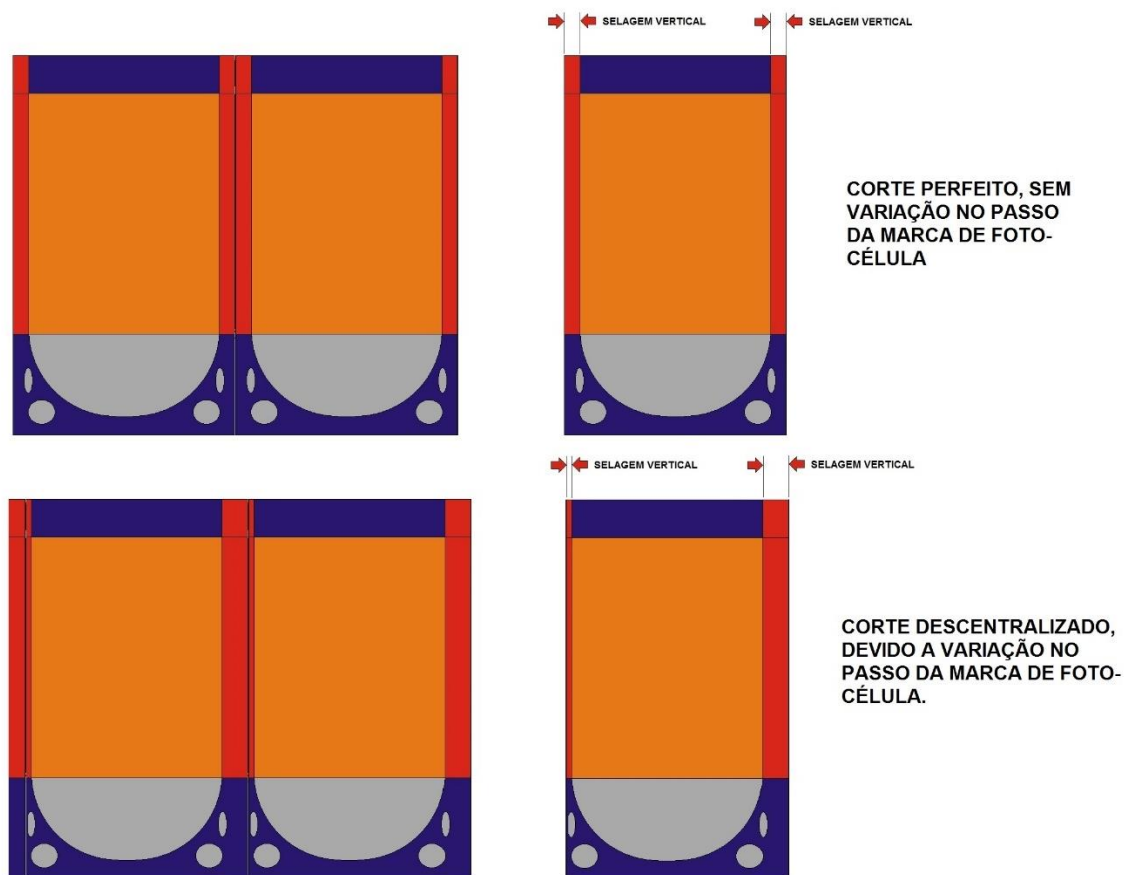
A aplicação de sensores para controle e monitoramento de processos se tornou cada vez mais necessário quando olhamos uma linha de produção industrial robusta. Analisando o cenário de produção de embalagens flexíveis, onde por sua vez, possuem uma série de parâmetros cruciais que devem ser controlados à risca para evitar grandes prejuízos.

Um pequeno desvio em algum desses parâmetros podem colocar em risco não só a qualidade da produção, como também, se não detectado, um transtorno com o cliente final gerando dificuldades no envase do produto. E se detectado possíveis atrasos com entrega do produto final ao cliente devido a necessidade de retrabalho. Depender do fator humano para controlar esses parâmetros coloca em risco a

robustez do processo, possibilitando assim variações de produções do mesmo produto e conseqüentemente variações que podem ocasionar desvios de qualidade.

A variação do passo de fotocélula está totalmente atrelada ao processo produtivo das fabricas de envases, sendo especificadas por eles a melhor configuração conforme as maquinas de formatação e envase. Quando o produto chega com o passo de fotocélula maior ou menor que o especificado, pode gerar alguns impactos como redução de velocidade de produção, descartes excessivos, necessidades de alteração configurações de máquinas bem como até perca de materiais envasados por vazamentos na embalagem.

Figura 29 - Corte descentralizado devido a variação de passo



Fonte: modenapak embalagem, 2016.

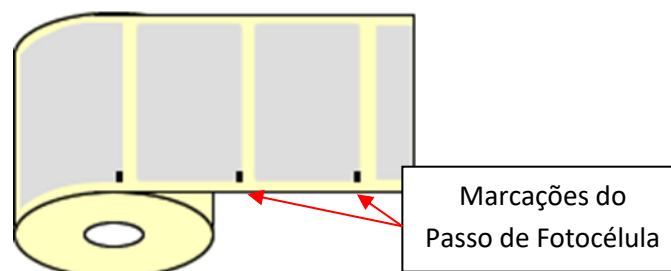
A produção de embalagens plásticas usualmente são realizadas com alta velocidade, tanto na impressão, quanto laminação e corte. Os dois processos que mais impactam a variação do passo de fotocélula é a impressão e laminação por possuírem dentro do seu processo produtivo, grandes estufas responsáveis por aquecimento do material, com o intuito do secamento da tinta e/ou adesivo composto

na embalagem. Essas estufas podem chegar até 90°C, ultrapassando a Tg do PET como visualizamos anteriormente.

1.4.1. Sensores Ópticos e Focélulas

Os sensores ópticos, em especial os sensores difusos que serão utilizados neste sistema, são responsáveis pela detecção precisa do passo de fotocélula. Um sensor óptico difuso detecta objetos ao emitir luz e receber o reflexo direto do próprio objeto, identificando sua presença pela intensidade da luz refletida. Quando um sensor óptico difuso detecta uma marca do passo de fotocélula, ele envia um sinal ao Controlador Lógico Programável (CLP), que, por meio de algoritmos específicos, mede o tempo entre essas detecções. Essa detecção permite verificar se o produto está sendo produzido dentro da variação mínima aceitável, minimizando a necessidade de ajustes manuais e reduzindo o risco de erros humanos.

Figura 30 - Passo de fotocélula em embalagem flexível



Fote: Do autor.

1.4.2. Encoders Incrementais

Os encoders incrementais complementam o controle da linha de produção, fornecendo leituras contínuas da velocidade da máquina, o que é crucial para ajustar o processo em tempo real. Esses dispositivos geram pulsos de acordo com a rotação, e para isto, é usualmente instalado nos próprios eixos a serem medidos como também podem ser utilizados roldanas encostados no eixo se movendo por atrito conforme a máquina se move. O CLP utiliza esses pulsos para calcular a velocidade exata, sincronizando-a com o sinal dos sensores ópticos. Isso possibilita a visualização instantânea caso o deslocamento esteja fora dos parâmetros, assegurando uma precisão ainda maior na produção.

1.4.3. CLPs (Controladores Lógicos Programáveis)

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) surgiram nos anos 1960 como uma solução para substituir sistemas de controle baseados em relés e temporizadores, que demandavam manutenção complexa e eram propensos a erros em operações de larga escala. A indústria automotiva foi uma das primeiras a adotar essa tecnologia, que trouxe flexibilidade, facilidade de programação e confiabilidade para processos industriais. Desde então, os CLPs tornaram-se o coração de sistemas automatizados, sendo essenciais em linhas de produção onde a precisão e a consistência são fundamentais.

Na automação industrial, o CLP atua como a central de controle, processando e gerenciando sinais recebidos de sensores e dispositivos auxiliares. No sistema de monitoramento proposto, o CLP recebe leituras dos sensores ópticos e do encoder incremental, que indicam a presença de marcações e a velocidade da linha, respectivamente. Esses dados são processados em tempo real pelo CLP, que verifica se o intervalo entre as marcações (passo de fotocélula) está dentro dos padrões estabelecidos. Em caso de desvios, o CLP envia sinais para a interface homem-máquina (IHM) e emite alertas para o operador, possibilitando rápidas correções nos parâmetros definidos e que a qualidade do produto final seja preservada.

1.5. CONTROLE DO PROCESSO

A evolução dos métodos de controle de processos industriais permitiu avanços significativos em termos de qualidade e eficiência. Historicamente, o controle era realizado manualmente, com operadores registrando dados de produção em planilhas de papel, o que resultava em um alto potencial de erros e dificuldades na análise de grandes volumes de informações. Esse método de coleta de dados tornava a análise estatística demorada, dificultando a identificação de problemas e atrasando a implementação de ações corretivas para otimizar o processo produtivo.

Com o desenvolvimento do Controle Estatístico de Processos (SPC), surgiram indicadores como Cp, Cpk, Pp e Ppk, que oferecem uma maneira eficiente de medir a consistência e a capacidade dos processos. Cp e Cpk são utilizados para

avaliar a capacidade potencial e efetiva do processo, respectivamente. Enquanto C_p mede a amplitude do processo em relação aos limites de especificação, C_{pk} considera a localização da média do processo em relação ao limite mais próximo, sendo mais indicado para avaliar a conformidade de processos que estão sob controle estatístico (BOTHE, 1997; MONTGOMERY, 2015).

1.5.1. ÍNDICE C_p

O índice C_p , conhecido como índice de capacidade potencial do processo, mede o quão capaz é o processo de produzir dentro dos limites especificados, assumindo que ele esteja perfeitamente centrado no valor nominal. Esse índice é calculado pela seguinte equação:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

Onde:

- LSE = Limite Superior de Especificação
- LIE = Limite Inferior de Especificação
- σ = Desvio-padrão do processo

Um valor de C_p maior que 1 indica que o processo tem uma variabilidade menor que o intervalo de especificação, sugerindo que é potencialmente capaz de atender aos requisitos. No entanto, esse índice não considera o posicionamento da média do processo em relação aos limites, sendo assim uma medida apenas da variabilidade.

1.5.2. ÍNDICE C_{pk}

Como o índice C_p não leva em conta o desalinhamento da média do processo em relação ao centro dos limites de especificação, Kane (1986) propôs o índice C_{pk} , que considera a localização da média em relação aos limites superior e inferior. O índice C_{pk} é dado pela equação:

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right)$$

Onde:

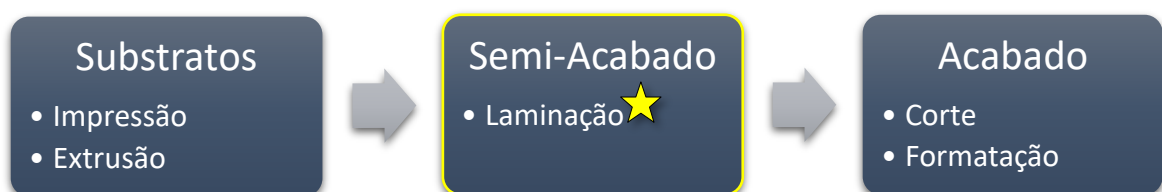
- μ = Média do processo
- LSE = Limite Superior de Especificação
- LIE = Limite Inferior de Especificação
- σ = Desvio-padrão do processo

Se C_p for igual a C_{pk} , o processo está centrado exatamente no valor nominal. No entanto, quando C_{pk} é menor que C_p , isso indica que o processo está descentrado, ou seja, a média do processo está deslocada em relação ao alvo nominal. Assim, a utilização conjunta dos índices C_p e C_{pk} fornece uma visão mais completa da capacidade do processo, considerando tanto a variabilidade quanto o alinhamento da média.

2. METODOLOGIA

A pesquisa se classifica como um projeto de desenvolvimento, direcionado à elaboração de uma solução prática em um contexto industrial. Essa pesquisa foi conduzida nas instalações de uma indústria parceira, uma renomada multinacional especializada na fabricação de embalagens flexíveis, que abrange processos de extrusão, impressão *flexográfica* e *rotográfica*, laminação, corte e formatação. O processo de laminação desempenha um papel crucial nessa indústria, sendo uma etapa vital para a conversão do produto final de embalagem plástica.

Figura 31 - Fluxo resumido para conversão de embalagem plástica



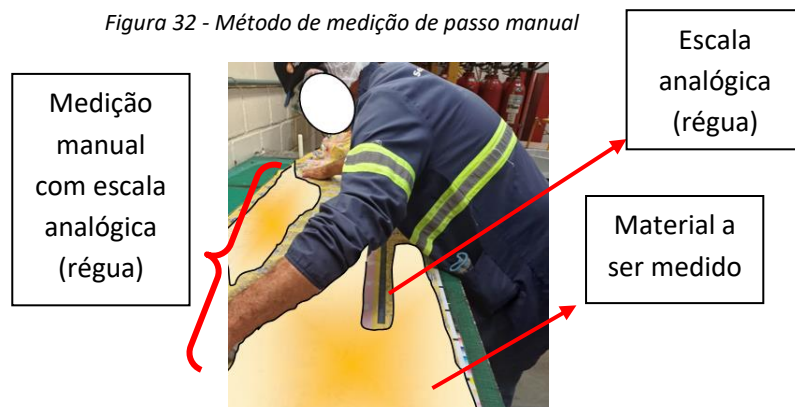
Fonte: Do autor.

A pesquisa se concentrou principalmente nas operações relacionadas à laminação, que é realizada em uma laminadora triplex, fase do processo onde os substratos são unificados com adesivos e condições térmicas. Além disso, a pesquisa incluiu medições realizadas no laboratório de qualidade, equipado com ferramentas de medição devidamente calibradas.

O impacto desse projeto é substancial. Ele visa a reduzir o trabalho manual, fornecendo uma ferramenta confiável para medição do passo de fotocélula, evitando

erros humanos. Também contribui para a melhoria da confiabilidade do processo, uma vez que realiza medições contínuas durante a produção, em oposição à amostragem.

Figura 32 - Método de medição de passo manual

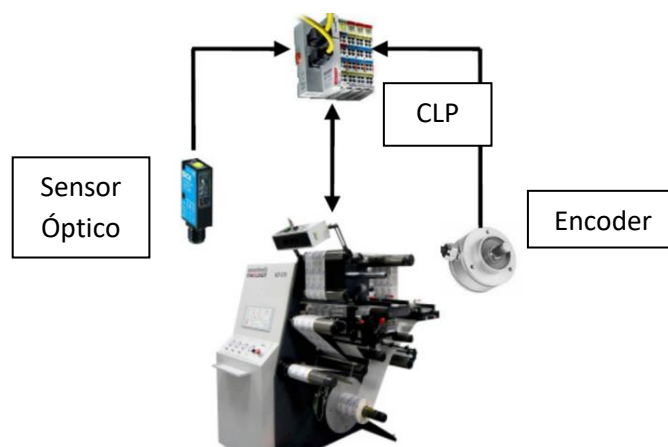


Fonte: Do autor (Indústria parceira)

A utilização do sistema proposto ajuda a evitar desvios de qualidade não identificados, que, de outra forma, poderiam atingir os clientes finais. Portanto, a implementação bem-sucedida desse projeto resultará em maior eficiência e economia de recursos na indústria parceira.

O sistema proposto é composto por sensores ópticos, um encoder incremental e uma interface gráfica amigável (IHM), cada um desempenhando um papel crucial na automação e no controle de qualidade do processo de laminação. Os sensores ópticos serão posicionados estrategicamente ao longo do processo de produção, de acordo com a distância entre as marcações de fotocélula nas embalagens flexíveis. Cada vez que uma marcação for detectada, o sensor enviará um sinal ao Controlador Lógico Programável (CLP), que será responsável pelo processamento dessas informações.

Figura 33 - Resumo da aplicação do projeto



Fonte: Do autor (Fornecedor parceiro).

Além disso, o encoder incremental terá a função de monitorar a velocidade da máquina, fornecendo dados essenciais para o cálculo preciso do passo de fotocélula. Esse passo representa a distância entre as marcações no material, e será previamente informado pelo operador no sistema. A partir disso, o CLP calculará o tempo ideal entre os sinais gerados pelos sensores ópticos, baseado na velocidade da máquina e no tamanho do passo inserido.

Com essas informações, o CLP poderá determinar, em tempo real, se a distância entre as marcações está dentro da variação mínima aceitável. Caso haja qualquer desvio em relação ao tempo esperado, o sistema alertará o operador através da interface gráfica (IHM), permitindo ajustes imediatos no processo, garantindo assim que a produção se mantenha dentro dos padrões de qualidade estabelecidos.

A metodologia foi desenvolvida para avaliar a eficácia do sistema implementado, que monitora o processo de laminação por meio de sensores e sistemas de controle automatizados. A seguir, detalho as etapas e ferramentas envolvidas na coleta e análise dos dados, além do processo de implementação do sistema na linha de produção.

2.1. COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada tanto de maneira manual quanto automática para garantir uma base comparativa. Atualmente, o processo de medição ocorre manualmente, com operadores utilizando escalas analógicas no início da produção e ao final de cada bobina, resultando em média de 10 a 20 medições por campanha de produção. Essas medições são registradas no sistema de controle de qualidade da indústria parceira, possibilitando análise de variação, mas apresentam limitações, pois somente o metro final denominado de “capa” da bobina é medida, o que pode ocultar variações que ocorreram ao longo da produção.

Para garantir a efetividade do sistema proposto, a coleta foi conduzida em duas linhas de produção completas, onde foram comparados os valores obtidos pela leitura manual com os resultados do sistema automatizado. Essa comparação, realizada por meio do resultado das capacidades realizadas no software Minitab.

2.1.1. Coleta de dados na metodologia antiga

Os valores de especificação de passo de fotocélula usualmente são medidos em um metro, pois com embalagens muito pequenas (como por exemplo sachês de ração molhada que possuem em média de 95mm de distância entre as marcações de passo de fotocélula) a leitura da variação individual é muito baixa, sendo assim, mais difícil ser detectada.

Para encontrar a especificação correta, é utilizada o seguinte cálculo:

$$\frac{1m}{PI} = RP$$
$$RP * PI = PM$$

Onde:

- 1m = 1 metro
- PI = Passo Individual
- RP = Repetições no Metro
- PM = Passo no Metro

$$1000mm / 95mm = 10,52^*$$

$$10 * 95mm = 950mm$$

**Arredondamos o resultado para baixo em nenhuma casa decimal.*

Se a especificação desse material do exemplo for de mais ou menos 1,8 mm de variação no metro, a especificação final seria de 948,2mm de limite inferior, 950mm de valor nominal e 951,8mm de limite superior.

Para o produto utilizado no estudo o valor do passo de fotocélula é de 979mm de limite inferior, 980mm de valor nominal e 981mm de limite superior. Sendo então uma variação de mais ou menos 1mm no metro.

2.1.2. Coleta de dados com o dispositivo eletrônico

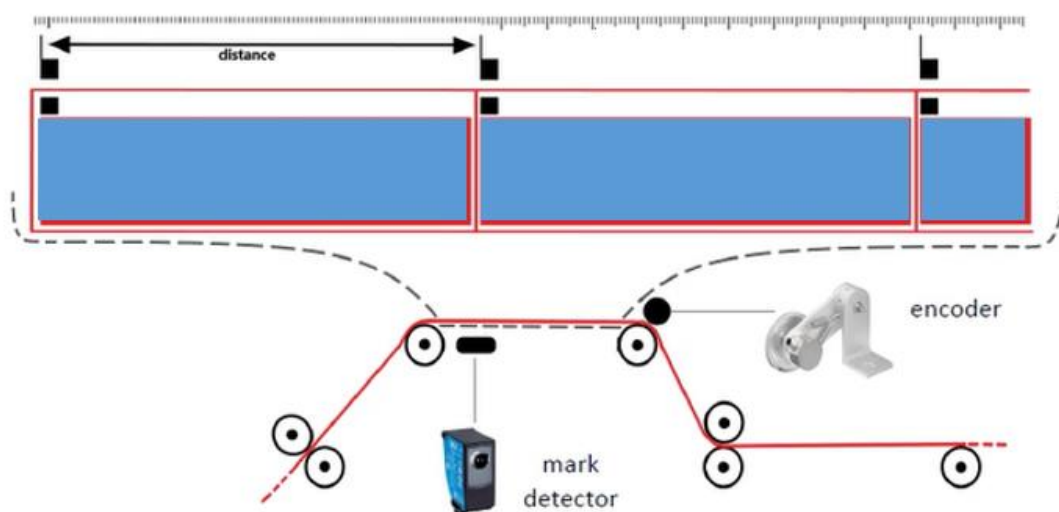
Em um processo industrial robusto como o de embalagens flexíveis, a frequência com que os sensores devem capturar os dados (como o passo de

fotocélula) é definida pela velocidade e a precisão do processo produtivo. Sensores ópticos e encoders incrementais, por exemplo, têm a capacidade de realizar leituras em milissegundos, capturando até mesmo as mínimas variações. Isso permite que, a cada ciclo, uma quantidade massiva de dados seja disponibilizada para os CLPs processarem.

Esses dados em alta frequência são então integrados ao CLP, que é programado para processá-los dentro de uma faixa predefinida de análise. Com isso, o CLP avalia continuamente se os parâmetros do processo estão dentro dos limites de especificação. Em situações em que um desvio é detectado, o CLP aciona alarmes, permitindo que ajustes sejam feitos pela equipe de operação.

A precisão trazida por essa combinação de sensores e CLPs beneficia diretamente o estudo da Capabilidade de Processo. Em vez de se basear em uma média de valores espaçados ou em medições pontuais, o uso de sensores de alta frequência e o processamento rápido pelo CLP possibilitam uma análise detalhada e contínua do processo.

Figura 34 - Exemplificação do funcionamento do sistema

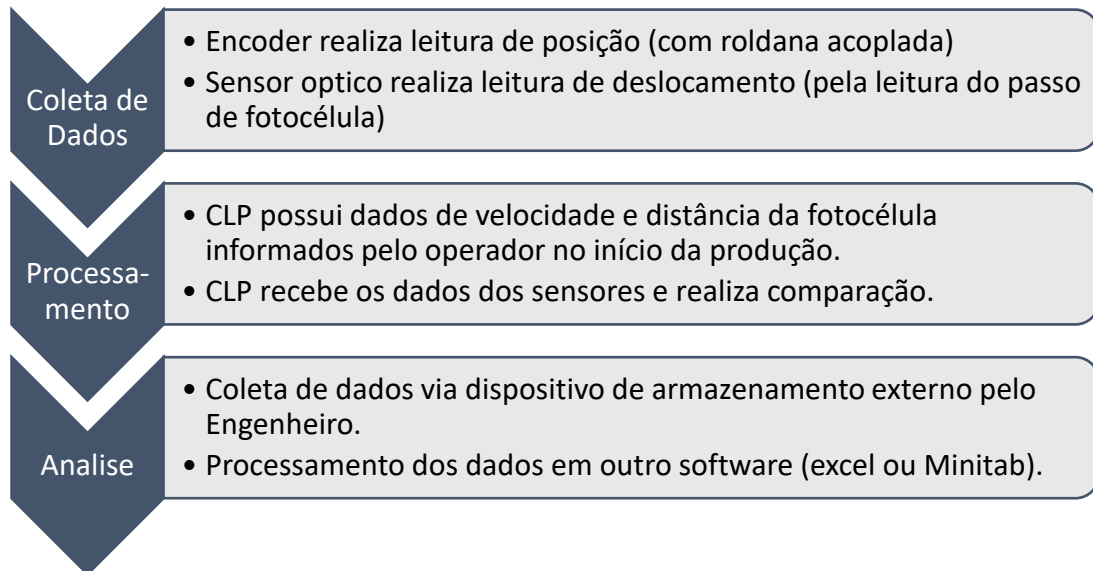


Fonte: Do autor. (Fornecedor Parceiro)

O equipamento de medição de passo, especialmente, permite monitorar a variação do passo de fotocélula, e, conseqüentemente, identificar até mesmo as menores discrepâncias em tempo real. Essa abordagem assegura um controle rigoroso da qualidade e, ao mesmo tempo, reduz desperdícios, pois qualquer ajuste

necessário pode ser realizado rapidamente, mantendo a capacidade do processo em níveis ideais.

Figura 35 - Fluxograma da coleta de dados

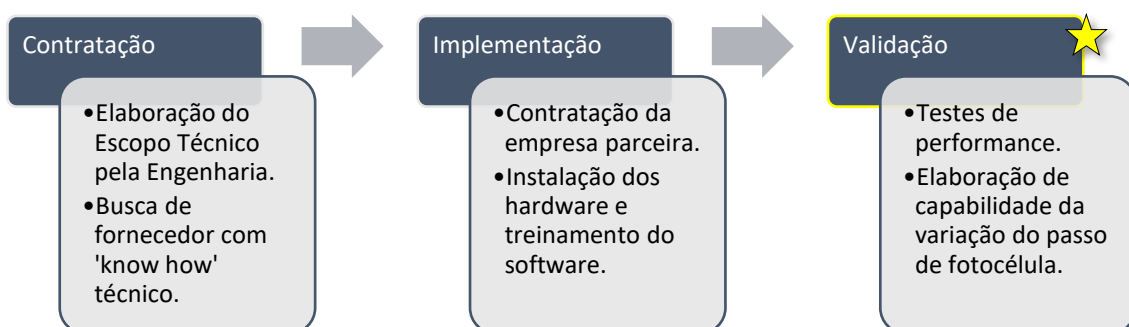


Fonte: Do autor

2.2. PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO

O projeto começou em resposta a reclamações de clientes sobre variações no passo de fotocélula. Após buscas por soluções no mercado, optou-se por um fornecedor específico devido à robustez da empresa e à possibilidade de uma parceria de longo prazo. A etapa inicial foi verificar a efetividade do sistema proposto antes de considerá-lo uma solução padronizada para todas as máquinas da fábrica.

Figura 36 - Fluxo resumido da implementação



Fonte: Do autor

2.2.1. Instalação dos Sensores Ópticos e Encoder Incremental

Os sensores ópticos e o encoder incremental foram instalados próximos ao fim do processo de laminação, onde, todos os substratos já passaram por todos os estresses térmicos do processo. O encoder foi fixado em uma roldana para evitar interferências causadas por variações de tensão no material, enquanto o sensor óptico foi posicionado após a laminação do último substrato. Essa configuração garante que o sensor opere com estabilidade e que a leitura seja precisa, uma vez que o material já está completo e não passará por aquecimento adicional.

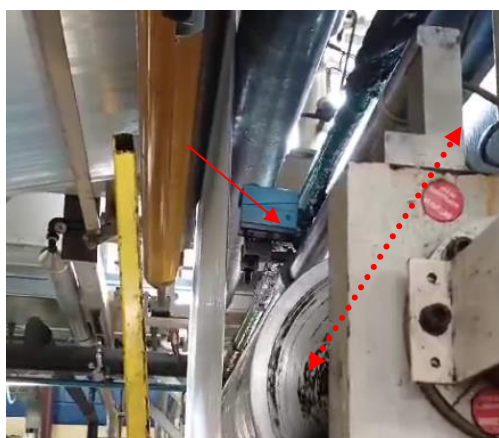
Figura 37 - Encoder instalado em máquina



Fonte: Do autor (Indústria parceira)

Para garantir flexibilidade, foi instalada uma barra ajustável ao longo da máquina, permitindo que o sensor óptico se ajuste à largura específica do material, mantendo a precisão da leitura.

Figura 38 - Sensor optico instalado em máquina

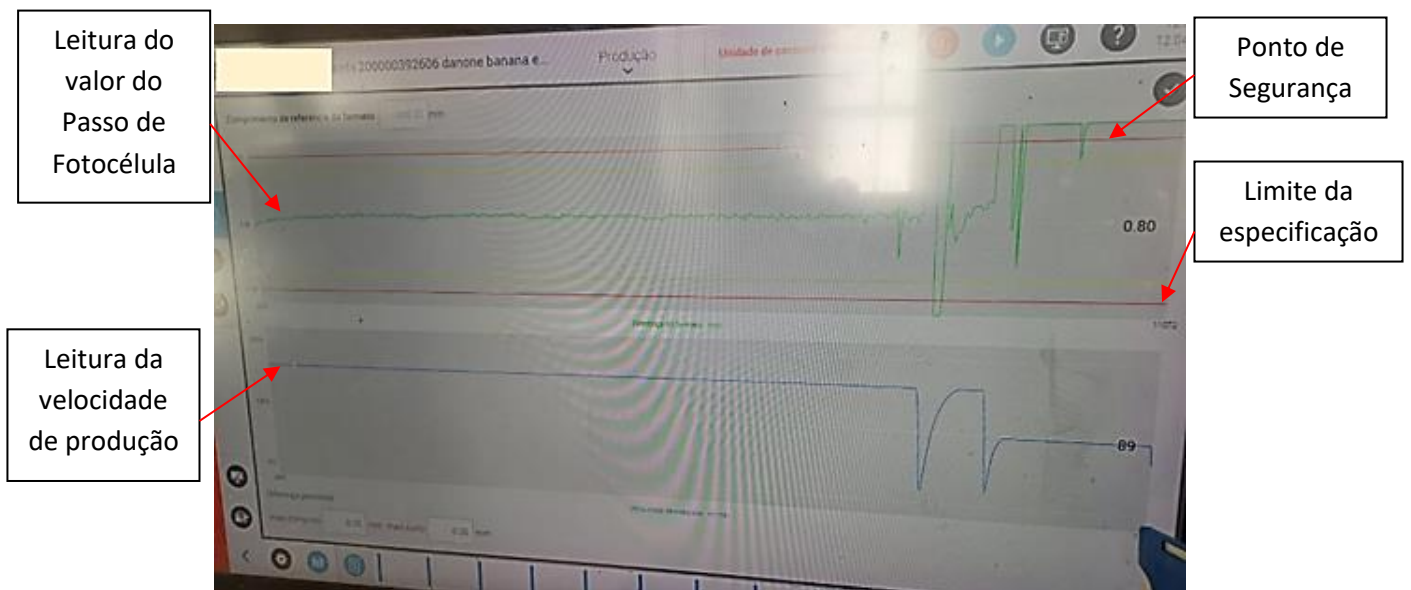


Fonte: Do autor (Indústria parceira)

2.2.2. Integração dos Dados com a Interface Gráfica (IHM)

Os dados de leitura dos sensores foram integrados a uma Interface Homem-Máquina (IHM), permitindo que a equipe operacional monitore as variações de passo em tempo real. A IHM exibe um gráfico com limites de especificação e pontos de segurança, alertando o operador caso o processo se aproxime dos limites superiores ou inferiores.

Figura 39 - IHM monitorando o passo de fotocélula



Fonte: Do autor (Industria parceira)

A torre de sinal possui três cores, sendo que, no caso de variação próxima ao limite de segurança, aciona o sinal amarelo. Se os limites forem ultrapassados, o sinal vermelho é ativado, indicando a necessidade de ação corretiva.

2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CAPABILIDADE

Para validar a eficácia do novo sistema, foram coletados dados de duas campanhas de produção utilizando os mesmos parâmetros. Essas informações foram analisadas no software Minitab, possibilitando o cálculo da Capabilidade de Processo, representada pelos índices Cpk e Ppk. A comparação entre os métodos de medição manual e eletrônica revelou variações antes não identificáveis, mostrando a

superioridade do sistema automatizado em manter o processo dentro das especificações de qualidade e garantindo, assim, uma produção mais consistente e de menor variação ao longo das bobinas.

Essa metodologia, que integra sensores, CLPs e análise de dados estatísticos, garante um processo de produção mais confiável e capaz de atender às especificações dos clientes de forma eficiente, bem como, a utilização de substratos mais complexos para controle de passo de fotocélula, onde possuem uma tg ainda menor, como por exemplo o BOPP (Polipropileno Biorientado) e o PP MDO (Polipropileno Orientado na Direção da Máquina).

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta subseção, são apresentados os dados coletados tanto pelo sistema eletrônico implementado quanto pelo método manual, possibilitando uma análise comparativa clara.

Os dados do sistema eletrônico são apresentados em gráficos, destacando a variação na posição das marcações de fotocélula ao longo do tempo, o que oferece um panorama detalhado e contínuo da estabilidade do processo. Esses dados são comparados aos dados manuais, coletados apenas no final de cada bobina (“capa”), revelando a limitação do método manual, onde possíveis variações ao longo do processo não são detectadas.

Posteriormente podemos visualizar a análise de capacidade dos dois processos afins de ter um panorama maior referente a variação do passo de fotocélula ao longo do processo de produção.

3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a análise dos dados antes e depois da implementação do sistema, observa-se um ganho significativo em precisão e confiabilidade.

No método tradicional, o operador necessita de aproximadamente 5 minutos para realizar cada medição. Em contrapartida, o sistema eletrônico permite o monitoramento contínuo, o que, além de liberar tempo para o operador, possibilita

maior controle do processo, reduzindo a necessidade de paradas inesperadas. Pois em medições manuais, pode-se encontrar um valor fora de especificação levando a perda de material já laminado até que o operador realize ajustes para correção dos parâmetros de processos.

Figura 40 - Tabelas comparativas entre os tempos de medições

| Medição Manual | | Medição Sistema Automático | |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Tempo (Min) | Quando | Tempo (Min) | Quando |
| 5 | Medição início de produção | 5 | Medição início de produção |
| 2 | Medição por bobina | 0 | Medição por bobina |
| - | 20 Bobinas por campanha | - | 20 Bobinas por campanha |
| 45 | Minutos Totais | 5 | Minutos Totais |

Fonte: Do autor.

Notavelmente é possível visualizar o tempo economizado da equipe operacional em realizar as medições comparadas com o sistema automático a medição manual. Esse cenário garante um ganho em produtividade bem como um ganho em qualidade pois o operador pode focar esforços em outros aspectos minimizando tempo investido com as medições.

A medição em tempo real de toda a extensão da bobina traz uma amostragem substancialmente maior em comparação à amostragem limitada pela capa, aumentando a representatividade dos dados coletados. Esse incremento contribui para identificar variações ao longo de todo o processo, aumentando a confiabilidade da produção e a qualidade do produto final.

Com a utilização do sistema automático, trouxe uma segurança maior para o time operacional em sequenciar mais testes em conjunto com a engenharia de processos, visando aumento de velocidade de máquina somados com ajustes em pressões e temperatura tendo como objetivo uma performance e produtividade ainda maior da produção. Pois com os dados em tempo real, é possível visualizar o impacto das alterações de processos refletidas no passo de fotocélula.

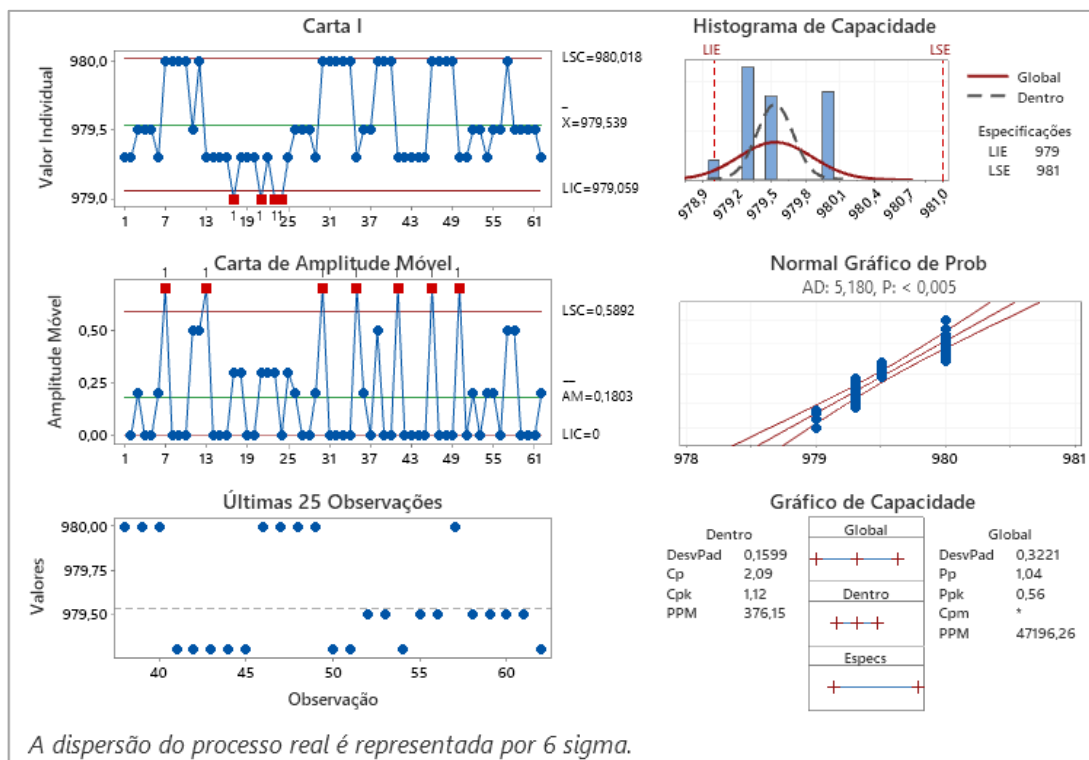
3.2. INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA (CAPABILIDADE)

Para validar a efetividade do sistema, foi realizada uma análise estatística de capacidade (Cpk e Ppk), comparando as duas abordagens.

A análise estatística das medições manuais indicou que a representatividade dos dados era limitada, o que poderia gerar uma falsa percepção de instabilidade e/ou estabilidade do processo, já que considerava apenas a capa da bobina.

Analisando apenas a capa da bobina, são encontrados valores maiores ou menores que a medição anteriores, contudo, as variações de passo são gradativas, ou seja, vão aumentando ou diminuindo aos poucos e não repentina. Quando realizamos a análise de capacidade desses valores, a variação repentina de uma bobina para outra traduz uma instabilidade e conseqüentemente um valor de Cpk menor.

Figura 41 - Capacidade realizada com as medições manuais



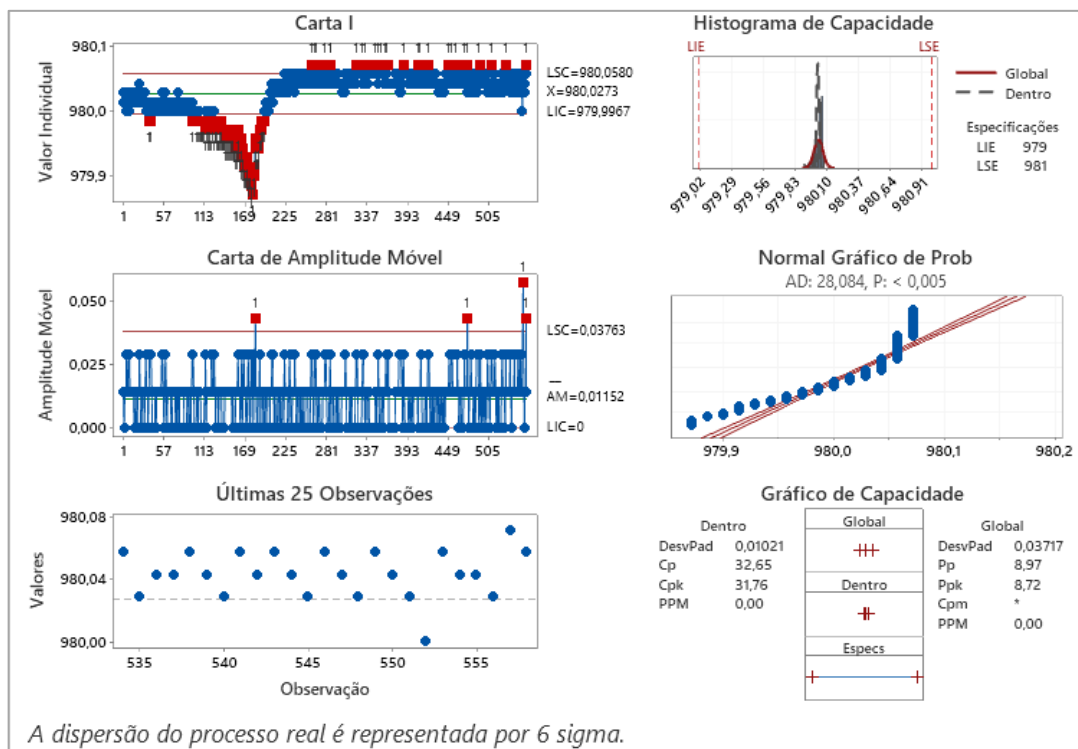
Fonte: Do autor.

A capacidade apresenta uma carta de controle com dados variando próximo a limite inferior e o valor nominal, conforme variação repentina citada anteriormente, fazendo com que a amplitude móvel contenha alguns pontos com variações acima de 0,5mm. E assim traz uma capacidade de Cpk de 1,12. Esse valor usualmente não é um valor satisfatório, como controle de processo da indústria parceira, uma capacidade aceitável é um valor de Cpk acima de 1,33.

Com o monitoramento contínuo e uma amostragem muito maior, os índices de capacidade refletiram de forma mais precisa o desempenho real do processo, mostrando um aumento na robustez e permitindo ajustes em tempo real conforme as tolerâncias do cliente.

O ajuste em tempo real dos parâmetros de processos facilita o controle do valor de passo de fotocélula, sendo que quando o valor começa a apresentar variações tendenciando aos limites inferior ou superior o operador pode realizar rapidamente uma alteração no controle de tensão e/ou temperatura afim de manter a estabilidade do valor medido.

Figura 42 - Capacidade realizada com o sistema eletrônico



Fonte: Do autor.

A capacidade traz uma carta de controle com dados variando entre a região do valor nominal da especificação, sendo 1mm acima ou abaixo do valor nominal. A amplitude móvel apresentou variações de no máximo 0,05mm. E assim traz uma capacidade de Cpk de 31,76. Esse valor traz uma representação de controle total do processo, traduzindo um processo totalmente estável.

Contudo, temos que observar que a taxa de amostragem foi realizada em mais de 500 medições em curto espaço de tempo (quando comparada com o

método de medição manual). Sendo assim, esse valor de Cpk não pode ser comparado diretamente com o valor de medição manual.

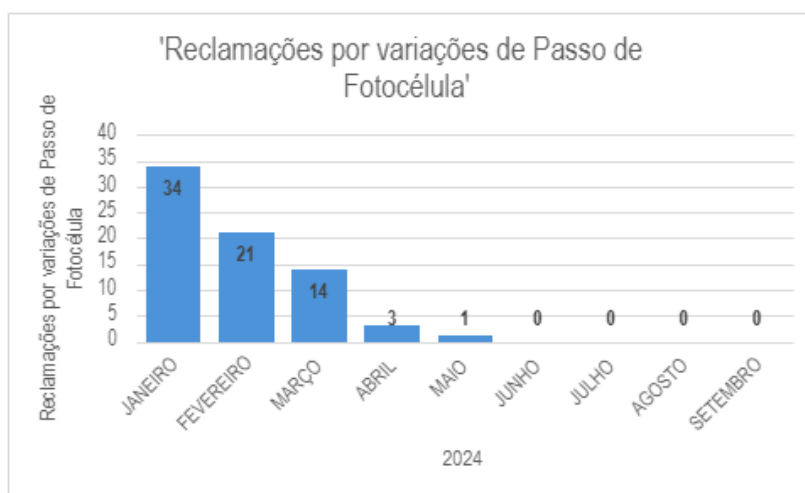
3.3. BENEFÍCIOS PARA O PROCESSO PRODUTIVO

A coleta automatizada permitiu otimizações nos parâmetros de produção, como ajustes de velocidade e tensionamento, de forma que o monitoramento em tempo real reduziu a possibilidade de desvios críticos.

O monitoramento contínuo possibilita ao operador observar, em tempo real, qualquer tendência de variação e realizar ajustes preventivos, reduzindo a chance de produzir bobinas fora das especificações.

Após a implementação do sistema automático no processo produtivo, foi alcançado uma estabilidade do processo significativa, no qual, foi refletida nas reclamações com o cliente da indústria parceira por variações do passo de fotocélula.

Figura 43 - Gráfico de reclamações do cliente da indústria parceira



Fonte: Do autor.

As reclamações referentes a variações de passo de fotocélula foram reduzidas a zero em poucos meses, devido ao cliente possuir lotes de fabricações antigas em seu estoque. Após a implementação do controle desse aspecto de qualidade também trouxe benefícios para outros produtos de outros clientes.

3.4. LIMITAÇÕES DO PROJETO

Apesar dos ganhos, o sistema trouxe algumas novas demandas operacionais. O operador precisa configurar uma receita inicial, informando as tolerâncias e a distância do passo antes do início de cada produção, o que adiciona uma responsabilidade ao processo. Caso a informação colocada pelo time operacional seja equivocada, trará uma leitura errônea e assim um prejuízo considerável.

Figura 44 - Ajuste inicial que operador deve colocar



Fonte: Do autor (Indústria parceira)

O sistema depende de uma manutenção rigorosa dos sensores ópticos e do encoder incremental como também um correto posicionamento, pois eventuais falhas ou atrasos na leitura podem comprometer a eficiência do controle em tempo real. Além disso, o ambiente de produção pode exigir ajustes periódicos no posicionamento dos sensores para manter a precisão na leitura das marcações.

4. CONCLUSÃO

4.1. VISÃO GERAL

Este trabalho teve como objetivo a implementação e análise de um sistema automatizado para monitoramento de variações de passo de fotocélula, visando reduzir os transtornos ocasionados por variações indesejadas no processo de

produção de embalagens. A partir de uma metodologia que comparou o método tradicional de amostragem manual com o sistema eletrônico de medição contínua, foi possível avaliar os ganhos em precisão, eficiência e confiabilidade. Os dados coletados pelo novo sistema mostraram-se capazes de oferecer uma visão detalhada e em tempo real de todo o processo de produção, atendendo ao objetivo principal de minimizar as variações de passo de fotocélula e, assim, evitar impactos negativos no produto final e nas relações com nossos clientes.

4.2. CONTRIBUIÇÕES DO PROJETO

O monitoramento *full time* permite detectar e ajustar desvios de maneira mais eficaz do que o método manual, onde o controle era realizado somente no fim da bobina. A maior frequência de dados coletados permitiu uma análise mais representativa do processo, o que resultou em um controle de qualidade mais robusto e confiável.

Com a automação do monitoramento, os operadores ganham tempo para outras atividades essenciais, ao mesmo tempo em que os riscos de erro humano são reduzidos. Além disso, o monitoramento contínuo diminuiu a necessidade de paradas para inspeções e possibilitou ajustes em tempo real, aumentando a eficiência do processo e a qualidade do produto final.

A coleta de dados em tempo real permite ajustes mais precisos nas variáveis de produção, como tensionamento e temperatura das estufas, com o objetivo de manter a estabilidade do passo de fotocélula e evitar outros problemas que podem aparecer no material.

4.3. TRABALHOS FUTUROS

Embora o projeto tenha alcançado seus objetivos iniciais, há oportunidades para evoluções e integrações adicionais que podem melhorar ainda mais o desempenho do sistema e o controle da produção.

A inclusão de uma interface que permita ao sistema de monitoramento atuar automaticamente nos acionamentos da máquina possibilitaria um processo de autocorreção. A cada variação identificada, o sistema poderia ajustar automaticamente as variáveis de produção, como tensionamento ou velocidade, sem a necessidade de intervenção manual, elevando o nível de automação e reduzindo possíveis desvios.

A integração de IA no sistema proporcionaria uma análise automática e contínua dos dados coletados, identificando padrões e realizando otimizações no processo com base em dados históricos. Com a IA, seria possível, por exemplo, prever tendências de variação de passo antes que elas se tornassem significativas, permitindo um controle preditivo e mais eficiente.

Essas melhorias futuras não apenas aumentariam a confiabilidade e a eficiência do processo, mas também trariam uma nova dimensão de inteligência ao sistema, facilitando ainda mais o trabalho dos operadores e garantindo um produto final de qualidade cada vez mais elevada. Assim, este projeto estabelece uma base sólida para a evolução contínua da indústria de embalagens, promovendo avanços significativos em automação, controle e qualidade.

REFERÊNCIAS

ANYADIKE, N. Laminação. In: HENRIQUE, R. (Trad.). Introduction to Flexible Packing. Vol. 1. São Paulo: Editora Blucher, 2009. p. 102.

BUENO, Jéssica Naihara Nunes. Implantação da Ferramenta Gage R&R em uma Indústria de Embalagens. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, v. 13, n. 13, p. 38, 2018.

DE LIMA, Luiz Roberto. Design de Embalagens Flexíveis para Impressão em Rotogravura. 2004.

DANTAS, R. L.; LIMA, C. A. P. Qualidade de Embalagens Flexíveis para Alimentos. In: 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007, Campina Grande, PB, Brasil.

GORNI, Antonio Augusto. Introdução aos plásticos. Revista Plástico Industrial, v. 10, n. 09, 2003.

HART, C.W.; BOGAN, C.E. O que é o prêmio Baldrige e o que representa para as empresas. São Paulo: Makroon Books, 1994.

Instituto de Embalagens. Processo de Laminação em Embalagens Flexíveis. In: Química Orgânica Industrial Milanese. Adesivos de poliuretano e laminação. 2016. p. 199.

MAZZUCCO, Marcos Marcelino. Estudo da Ocorrência de Canaletas no Processo de Laminação em uma Indústria de Embalagens Flexíveis. 2019.

MANRICH, S. Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde. 1. ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2005.

MERCADO mundial de embalagens. ABRE, G1, p. 1, 22 fev. 2021. Disponível em: <https://www.abre.org.br/inovacao/mercado-mundial-de-embalagens-atingira-us-1-trilhao-em-2024/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

ROBERTSON, G. L. Food Packaging: principles and practice. New York: Marcel Dekker, 1993.

RODRIGUES, Taynara Tatiane. Polímeros nas Indústrias de Embalagens.

SARANTÓPOULOS, et al. Embalagens Plásticas Flexíveis. CETEA/ITAL, 2002. 267 p.

SILVEIRA, Fabiana. AB Flexo – Associação Brasileira de Técnica de Flexografia. Laminação: agregando valor à embalagem, 2015. Disponível em: <https://abflexo.org.br/2015/02/06/logistica-tintas-2/>. Acesso em: 23 out. 2023.

AUMENTO no CAGR. Mordor Intelligence. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/packaging-industry-in-brazil>. Acesso em: 1 ago. 2023.

ALTA e queda na produção de embalagens. ABIEF. Disponível em: <https://www.abief.org.br/flex-tendencias/industria-brasileira-de-embalagens-plasticas-flexiveis-registra-alta-na-producao-e-queda-no-faturamento-em-2022-2/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

INFLUÊNCIA da embalagem. Food Connection. Disponível em: <https://www.foodconnection.com.br/embalagens/embalagens-criativas-o-poder-para-agregar-valor-ao-produto>. Acesso em: 1 ago. 2023.

COMPORTAMENTO do polímetro. Repositório UFU. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24082>. Acesso em: 1 ago. 2023.

CHOQUEHUANCA, Rosario Huanaco. Trabalho de conclusão de curso. Control De Calidad En Una Empresa De Embalages Flexibles. Facultad de ingeniería química e têxtil. Universidad nacional de Ingeniería. (Figura). Lima: UNI. 2014.

MODENAPAK EMBALAGEM. *Defeitos em Embalagens*. Disponível em: <https://modenapakembalagem.wordpress.com/page/3/>. Acesso em: 2 out. 2024.

BOTHE, D. R. *Measuring Process Capability: Techniques and Calculations for Quality and Manufacturing Engineers*. McGraw-Hill, 1997.

CLEMENTS, J. A. *Process Capability Calculations for Non-normal Distributions*. Quality Progress, 1989.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. 7ª ed. Wiley, 2015.

SASSI, R. *Estatística Aplicada à Qualidade*. 2016.

OLIVEIRA, Josenildo Brito de; SOUTO, Ricardo Romualdo; MAIA, Rafaella Dias de Almeida; MEIRA, Julia Alexandre; LIMA, Victor Serrano Paulino. Análise da capacidade de um processo: um estudo de caso baseado nos indicadores Cp e Cpk. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 31., 2011, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: ABEPRO, 2011.

Kane, V. E. (1986). Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, 18(1), 41-52.