

Aplicação De Inferência Fuzzy Para Tomada De Decisão Em Processos De SMT No Polo Industrial De Manaus

Herbety Lima Leite¹, David Barbosa De Alencar², Hellen Lima Leite Alves³, Eliton Smith Dos Santos⁴, Paola Souto Campos⁵, Nadime Mustafa Morães⁶

¹Acadêmico Do Curso De Pós-Graduação Em Engenharia, Gestão De Processos, Sistemas E Ambiental Do Instituto De Tecnologia E Educação Galileo Da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM). Avenida Joaquim Nabuco No. 1950. Center. Manaus-AM. ZIP CODE: 69.020-030. Brazil.

^{2,3,4,5}Professor Do Curso De Pós-Graduação Em Engenharia, Gestão De Processos, Sistemas E Ambiental Do Instituto De Tecnologia E Educação Galileo Da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM). Avenida Joaquim Nabuco No. 1950. Center. Manaus-AM. ZIP CODE: 69.020-030. Brazil.

⁶Professora Permanente Da Universidade Do Estado Do Amazonas (ENS/UEA). Av. Djalma Batista, 2470 - Chapada, Manaus - AM, 69050-010. Brazil.

Resumo:

A Tecnologia de Montagem de Superfície (SMT) é amplamente utilizada na produção de componentes eletrônicos, especialmente no Polo Industrial de Manaus (PIM), um dos maiores centros de produção eletrônica do Brasil. Contudo, sua complexidade e sensibilidade a variações de parâmetros, como temperatura e alinhamento, apresentam desafios significativos à precisão e consistência do processo. Métodos tradicionais de controle, como o PID, muitas vezes falham em atender às demandas de adaptabilidade e eficiência requeridas nesses cenários. A lógica fuzzy surge como uma alternativa promissora, oferecendo suporte em situações de incerteza e variabilidade. Este estudo desenvolveu e implementou um sistema de inferência fuzzy para o controle de parâmetros críticos em processos SMT no PIM. A metodologia envolveu a identificação de variáveis chave, como temperatura e pressão, e a construção de um modelo fuzzy baseado em regras linguísticas e conhecimento especializado. O sistema foi validado por meio de análise comparativa antes e depois de sua implementação, avaliando aspectos como eficiência produtiva, taxa de retrabalho e qualidade final dos produtos. A aplicação do sistema fuzzy resultou em melhorias significativas na eficiência do processo SMT. Observou-se uma redução nas falhas de montagem, menor necessidade de retrabalho e maior consistência na produção. Além disso, o sistema demonstrou maior capacidade de adaptação a variações operacionais em comparação aos métodos tradicionais de controle, contribuindo para uma produção mais sustentável e eficiente. O uso de sistemas de inferência fuzzy em processos SMT no PIM provou ser uma abordagem eficaz para otimizar a tomada de decisão, melhorando a qualidade e a eficiência produtiva. Esta pesquisa reforça o papel da lógica fuzzy como uma ferramenta viável para atender às demandas da Indústria 4.0, promovendo inovações em automação industrial e contribuindo para a competitividade das empresas do PIM.

Palavras-chaves: Inferência fuzzy; SMT; PIM; automação industrial; Indústria 4.0.

Date of Submission: 07-12-2024

Date of Acceptance: 17-12-2024

I. Introdução

A crescente demanda por precisão, eficiência e qualidade na produção industrial tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias de controle e automação. No contexto da Tecnologia de Montagem de Superfície (SMT), amplamente utilizada para a montagem de componentes eletrônicos, essas demandas são ainda mais desafiadoras devido à complexidade do processo e à sensibilidade a variações de parâmetros como temperatura, pressão e alinhamento. No Polo Industrial de Manaus (PIM), um dos principais centros de produção eletrônica do Brasil, a otimização de processos SMT é fundamental para garantir a competitividade e sustentabilidade das empresas locais.

Métodos tradicionais de controle, como o controle proporcional-integral-derivativo (PID), são frequentemente aplicados nesses processos. No entanto, esses métodos apresentam limitações significativas, especialmente em cenários onde há alta variabilidade e incertezas. Pequenas flutuações nos parâmetros de montagem podem levar a defeitos, retrabalho e perdas materiais, impactando diretamente na produtividade e nos custos operacionais.

Nesse cenário, a lógica fuzzy tem emergido como uma alternativa promissora. Introduzida por Lotfi Zadeh na década de 1960, a lógica fuzzy permite a criação de modelos de controle baseados em regras linguísticas que capturam a experiência humana e se adaptam dinamicamente às mudanças de condições

operacionais. Aplicada em processos SMT, essa abordagem pode melhorar a precisão e a consistência do controle, reduzindo falhas e aumentando a eficiência produtiva.

Este artigo tem como objetivo apresentar a aplicação de um sistema de inferência fuzzy em processos SMT no PIM. A pesquisa desenvolveu e implementou um modelo fuzzy para monitorar e ajustar parâmetros críticos em tempo real, avaliando seu impacto na qualidade e na produtividade do processo. Os resultados demonstram o potencial da lógica fuzzy como uma ferramenta inovadora para atender às demandas da Indústria 4.0, contribuindo para o avanço da automação industrial e para o fortalecimento do setor eletroeletrônico no Brasil.

II. Referencial Bibliográfico

Administração da Produção e Processos Industriais

A administração da produção é uma área estratégica para organizações que buscam competitividade em mercados dinâmicos. Com o avanço da globalização e da tecnologia, essa função vai além da fabricação de bens e serviços, integrando estratégias voltadas à inovação, sustentabilidade e eficiência dos processos (Slack et al., 2009; Robert et al., 2020). A implementação de metodologias como Lean Manufacturing, que elimina desperdícios, e Six Sigma, que reduz variabilidades, tem transformado o gerenciamento da produção, promovendo uma cultura de melhoria contínua (Johansson, 2022; Laureani, 2019).

Além disso, a Indústria 4.0 trouxe tecnologias como IoT e inteligência artificial, permitindo que fábricas adotem processos inteligentes e flexíveis, alinhados às novas demandas de mercado (Dutta et al., 2020; Raja Santhi & Muthuswamy, 2023). A sustentabilidade também ganhou destaque, incentivando práticas que reduzem desperdícios e emissões, como no caso do conceito "Lean & Green" da Toyota (Kazakova & Lee, 2022). Essas abordagens demonstram que a administração da produção é um pilar essencial para organizações que almejam competitividade e crescimento sustentável (Oztelem & Gursev, 2020).

Pequenas e médias empresas (PMEs) enfrentam desafios específicos, como restrições financeiras e limitações em mão de obra qualificada, que dificultam a modernização de seus processos produtivos (Cohen, Naoum & Vlismas, 2014; Eggers, 2020). No entanto, ferramentas como Lean Manufacturing e Just-in-Time (JIT) têm ajudado as PMEs a melhorar a eficiência operacional e reduzir custos (Maglianesi, 2019; Dlodlo, 2011). Soluções tecnológicas, como ERPs simplificados, também facilitam o gerenciamento de recursos e processos, permitindo um controle mais preciso (Rahimi, 2016; Pessoa & Becker, 2020).

Estudos de caso demonstram que mesmo pequenas inovações podem trazer resultados significativos. Por exemplo, uma pequena indústria têxtil no Brasil conseguiu melhorar sua eficiência com o 5S, enquanto uma fábrica de alimentos reduziu custos de estoques em 20% ao implementar um ERP (Mofolasayo et al., 2022). Essas práticas comprovam que as PMEs podem superar desafios e alcançar maior competitividade com soluções adaptadas e estratégicas (Alkhoraif, Rashid & McLaughlin, 2019).

Tecnologia de Montagem de Superfície (SMT)

A tecnologia de montagem de superfície (SMT) revolucionou o setor eletrônico, permitindo maior densidade de componentes, redução de custos e aumento da eficiência produtiva (Prasad, 1997; Strauss, 1998). Comparada à tecnologia de inserção por furos (THT), a SMT é mais adequada para atender à demanda por dispositivos compactos e leves, como smartphones e laptops (Lee, 2002; Feryance & Shubert, 1993). A automação dos processos SMT, como a montagem de componentes e soldagem por refusão, é essencial para garantir precisão e eficiência, apesar dos desafios logísticos e de programação de máquinas (Leu et al., 1993; Cszasz et al., 2000).

Os componentes SMT, como melfs, capacitores multicamadas e indutores de chip, apresentam vantagens como melhor dissipação térmica e maior confiabilidade elétrica, contribuindo para o desempenho de dispositivos modernos (Strauss, 1998; Hemans-Davis & Sunstrum, 1993). A SMT continua sendo indispensável para o setor eletrônico, promovendo inovação e sustentabilidade em um mercado competitivo.

Lógica Fuzzy e Controle Adaptativo

O controle fuzzy, baseado na lógica fuzzy de Lotfi Zadeh, oferece flexibilidade e adaptabilidade para lidar com sistemas complexos e incertos. Ele utiliza variáveis linguísticas, como "baixo" e "alto", permitindo um controle mais intuitivo em cenários onde modelos matemáticos precisos são difíceis de implementar (Estevão, 2019; Suave, 2024).

A estrutura do controlador fuzzy inclui fuzzificação, base de regras, inferência e defuzzificação, etapas que garantem a adaptação a condições dinâmicas. Essa técnica é amplamente utilizada em microgrids fotovoltaicos para otimizar o gerenciamento de energia e integrar diferentes fontes energéticas, além de ser aplicada em sistemas de automação industrial e robótica (Nascimento, 2019; Almeida & Silveira, 2021). Suas vantagens incluem maior flexibilidade, eficiência operacional e redução de custos (Junior et al., 2020).

O controle fuzzy tem se consolidado como uma ferramenta indispensável para otimizar processos e gerenciar variáveis incertas, com potencial significativo para atender às demandas da automação inteligente e do gerenciamento eficiente de recursos.

III. Materiais E Métodos

O estudo realizado no Polo Industrial de Manaus (PIM) teve como objetivo geral aplicar um sistema de inferência fuzzy para otimizar a tomada de decisões nos processos de SMT, melhorando a qualidade e eficiência produtiva. Para isso, os parâmetros críticos de controle, como demanda de produção, qualidade e capacidade de montagem, foram identificados por meio de revisão bibliográfica e consultas com especialistas.

Com base nesses parâmetros, foi desenvolvido e implementado um sistema fuzzy, utilizando variáveis linguísticas e regras para ajustar os processos SMT em tempo real. A avaliação foi conduzida comparando indicadores antes e depois da implementação, incluindo redução de retrabalho, desperdícios e aumento da eficiência produtiva. Os resultados validaram o impacto positivo do sistema na otimização de recursos e melhoria da produtividade no PIM.

IV. Resultados

Identificação dos Principais Parâmetros de Controle no Processo de SMT

Os parâmetros operacionais foram estabelecidos com base em uma análise criteriosa, envolvendo revisões bibliográficas e consultas a especialistas da área. Foram identificadas variáveis críticas que impactam diretamente a eficiência e a qualidade no processo de Montagem Superficial (SMT). Entre essas variáveis, destacam-se a demanda de produção, os critérios de qualidade e a capacidade de montagem. Todas essas informações foram integradas ao sistema fuzzy, permitindo ajustes automáticos e precisos em tempo real, conforme as condições do processo.

As variáveis de entrada do sistema de inferência fuzzy correspondem aos fatores que afetam o desempenho do processo SMT e que orientam os ajustes necessários para atender aos objetivos de qualidade e eficiência. Com base nas análises realizadas, essas variáveis foram organizadas e detalhadas na tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis de Entrada

| Variável de entrada | Valor Linguístico |
|-----------------------------------|-------------------|
| Demanda de Produção | Baixa |
| | Média |
| | Alta |
| Capacidade de Inserção Automática | Insuficiente |
| | Adequada |
| | Excelente |
| Capacidade de Montagem Final | Insuficiente |
| | Moderada |
| | Alta |
| Qualidade | Baixa |
| | Satisfatória |
| | Excelente |
| NPI – Desempenho dos Processos | Precário |
| | Regular |
| | Ótimo |

As variáveis de saída são os resultados ou decisões geradas pelo sistema fuzzy com base nas entradas fornecidas. No contexto de SMT, as variáveis de saída são apresentadas na tabela 2:

Tabela 2 – Variáveis de Saída

| Variável de Saída | Valor Linguístico |
|--|-------------------|
| Prioridade de Alocação de Recursos | Baixa |
| | Moderada |
| | Alta |
| Ajuste nos Parâmetros do Processo SMT | Pequeno |
| | Médio |
| | Grande |
| Taxa de Produção Recomendada | Reduzida |
| | Estável |
| | Acelerada |
| Indicador de Conformidade de Qualidade | Baixo |
| | Médio |
| | Alto |
| Necessidade de Intervenção no Processo | Nenhuma |
| | Moderada |
| | Alta |

Implementação do sistema de inferência fuzzy no processo SMT.

A implementação do sistema fuzzy no processo de Montagem Superficial (SMT) no Polo Industrial de Manaus foi avaliada quanto à sua eficácia na redução de retrabalhos, desperdícios e aumento da produtividade. O modelo computacional desenvolvido utiliza lógica fuzzy para otimizar a tomada de decisão, ajustando parâmetros operacionais com base em variáveis como demanda, eficiência e qualidade.

Os resultados mostraram que o sistema melhora a alocação de recursos, garante conformidade com padrões de qualidade e reduz intervenções manuais. Indicadores como aderência à demanda e otimização de recursos validaram a abordagem fuzzy como uma solução eficiente e flexível para processos SMT, alinhada às exigências da Indústria 4.0.

A simulação foi conduzida com base em valores representativos das variáveis de entrada e saída, conforme descrito na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Valores das Variáveis de Entrada e Saída na Simulação

| Tipo de Variável | Atribuídos | Valor |
|------------------|--|------------------|
| Entrada | Demanda de Produção | 7 (Média) |
| Entrada | Capacidade de Inserção Automática | 3 (Adequada) |
| Entrada | Capacidade de Montagem Final | 6 (Moderada) |
| Entrada | Qualidade | 4 (Satisfatória) |
| Entrada | Desempenho NPI | 2 (Precária) |
| Saída | Prioridade de Alocação de Recursos | 5,3 (Moderada) |
| Saída | Ajuste nos Parâmetros do Processo SMT | 7,7 (Grande) |
| Saída | Taxa de Produção Recomendada | 5,0 (Estável) |
| Saída | Indicador de Conformidade de Qualidade | 4,8 (Média) |
| Saída | Necessidade de Intervenção no Processo | 7,7 (Alta) |

A tabela 3 apresenta os valores representativos das variáveis de entrada e saída utilizadas na simulação do sistema fuzzy aplicado ao processo SMT. As variáveis de entrada incluem fatores como demanda de produção, capacidade de inserção automática, capacidade de montagem final, qualidade e desempenho NPI, classificadas em níveis como "média," "adequada," e "moderada."

As variáveis de saída indicam os resultados gerados pelo sistema fuzzy, como a prioridade de alocação de recursos, ajustes nos parâmetros do processo SMT, taxa de produção recomendada, conformidade de qualidade e necessidade de intervenção no processo. Estes resultados foram categorizados em valores quantitativos e qualitativos (por exemplo, "grande," "estável" e "alta"), mostrando o impacto do modelo na eficiência e qualidade do processo SMT.

Resultados da simulação da Logica Fuzzy

As figuras de 1 a 5, a seguir apresentam os resultados da aplicação do sistema fuzzy em diferentes aspectos do processo SMT. Cada gráfico mostra as funções de pertinência das variáveis de entrada ou saída e o resultado fuzzy defuzificado para tomada de decisão.

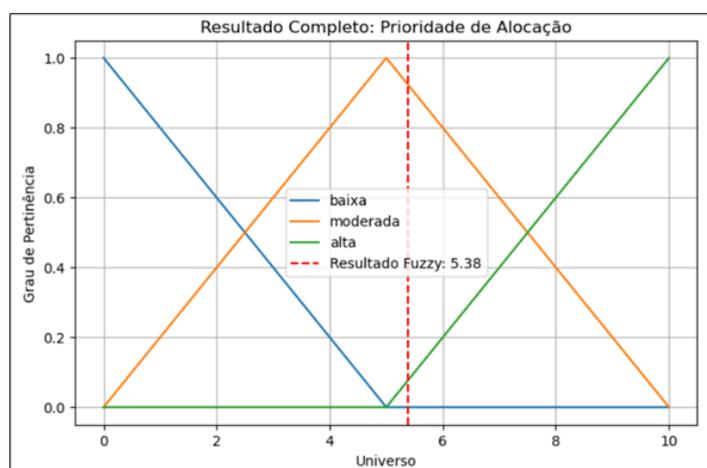


Fig. 1 - Prioridade de Alocação de Recursos:

O gráfico da figura 1 avalia a prioridade de alocação de recursos no processo SMT com base nas categorias "baixa," "moderada" e "alta." O resultado fuzzy defuzificado (5,38) indica uma prioridade situada entre moderada e alta. Isso significa que, para as condições analisadas, é necessário dar atenção relevante à alocação de recursos, otimizando a eficiência sem comprometer a produtividade ou os recursos disponíveis.

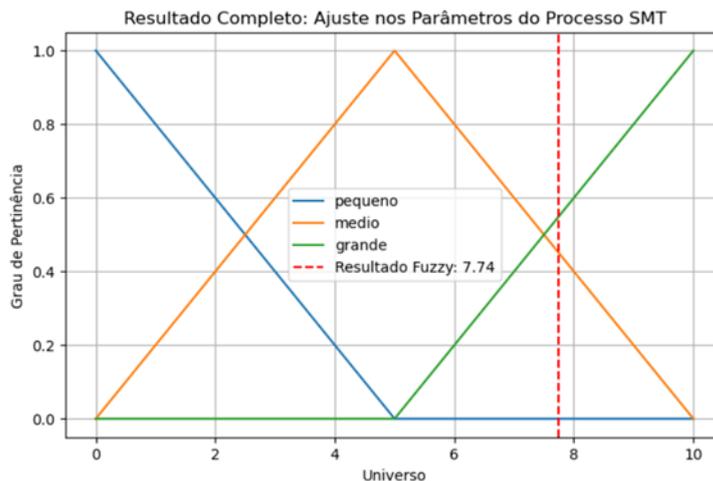


Fig. 2 - Ajuste nos Parâmetros do Processo SMT:

O gráfico da figura 2 apresenta os níveis de ajuste necessários (pequeno, médio, grande) para os parâmetros operacionais. Com um resultado fuzzy de 7,74, o sistema identificou a necessidade de um ajuste significativo ("grande"). Isso reflete que os parâmetros atuais do processo SMT precisam ser alterados substancialmente para atender aos requisitos de qualidade e eficiência demandados no momento.

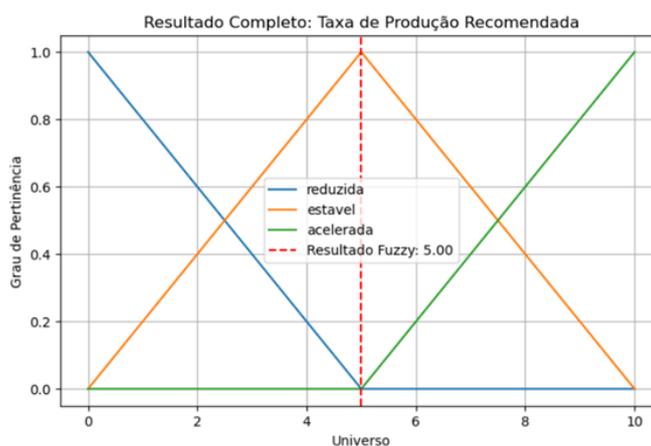


Fig. 3 - Taxa de Produção Recomendada:

No gráfico da figura 3, é possível verificar as categorias "reduzida," "estável" e "acelerada" para a taxa de produção. O valor defuzificado de 5,00 aponta para uma produção estável, sugerindo que o processo está em equilíbrio. Isso significa que, nas condições analisadas, não há necessidade de mudanças drásticas na velocidade de produção, permitindo um fluxo consistente e alinhado às demandas.

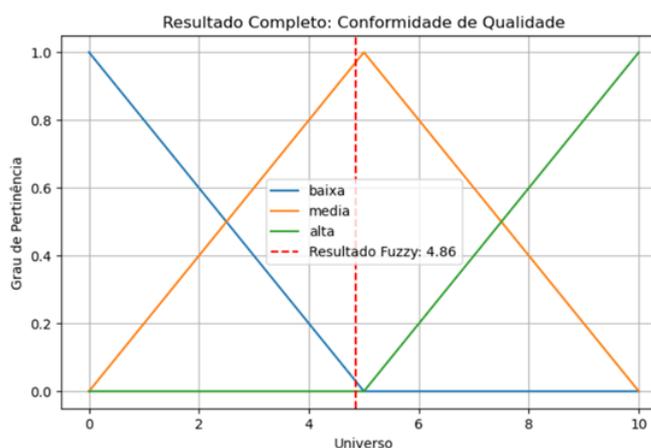


Fig. 4 - Conformidade de Qualidade:

O gráfico da figura 4 avalia a conformidade do processo com os padrões de qualidade exigidos, categorizados como "baixa," "média" e "alta." O resultado fuzzy de 4,86 indica uma qualidade média, próxima da alta. Isso sugere que, embora os produtos atendam parcialmente aos padrões esperados, melhorias podem ser implementadas para alcançar um nível de qualidade mais elevado.

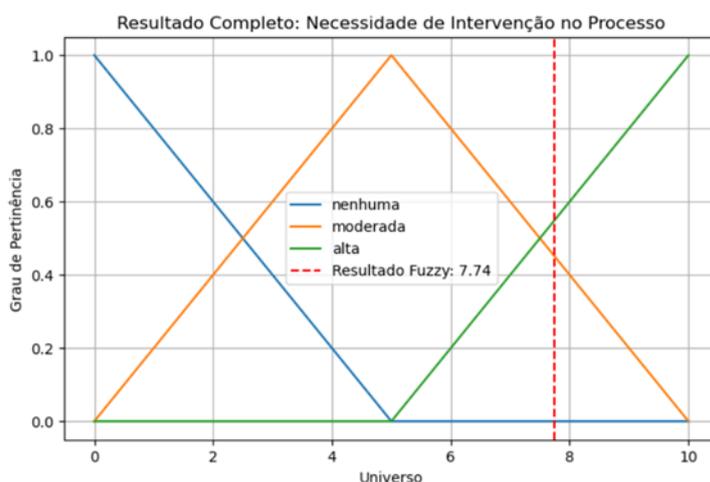


Fig. 5 - Necessidade de Intervenção no Processo:

O gráfico da figura 5 mede a necessidade de intervenção no processo SMT, com categorias como "nenhuma," "moderada" e "alta." O valor fuzzy de 7,74 sinaliza uma necessidade alta de intervenção. Esse resultado destaca que ações corretivas ou preventivas são urgentes para corrigir problemas ou evitar falhas que possam comprometer a eficiência ou a qualidade do processo.

Essas análises detalhadas fornecem informações práticas para ajustar e otimizar o processo SMT, mostrando como o sistema fuzzy pode ser usado para apoiar decisões estratégicas no gerenciamento industrial.

Resultado da defuzzificação

O método de defuzzificação pelo Centro de Gravidade (COG) foi utilizado para converter os resultados fuzzy em valores numéricos, facilitando a interpretação e aplicação prática na gestão do processo SMT. Em resumo, os valores obtidos para cada variável de saída foram:

- Prioridade de Alocação de Recursos: Valor de 5,38, indicando prioridade moderada com leve tendência para alta, refletindo equilíbrio na alocação de atenção e investimentos em áreas críticas.
- Ajuste nos Parâmetros do Processo SMT: Valor de 7,74, sugerindo a necessidade de ajustes significativos nos parâmetros operacionais.

Taxa de Produção Recomendada: Valor de 5,00, indicando que a produção deve permanecer estável sem alterações significativas.

- Conformidade de Qualidade: Valor de 4,86, posicionando a qualidade como média, com potencial para melhorias.
- Necessidade de Intervenção no Processo: Valor de 7,74, sinalizando uma necessidade alta de intervenção para corrigir problemas ou melhorar o desempenho.

O método COG provou ser eficaz para traduzir a complexidade das condições do sistema SMT em dados objetivos, permitindo uma priorização clara e decisões informadas nas variáveis analisadas.

Validação dos impactos do sistema fuzzy no processo SMT.

A aplicação de um sistema fuzzy no gerenciamento e otimização de processos de Montagem Superficial (SMT) demonstrou impactos significativos em diversos aspectos críticos da produção, evidenciados pelos resultados apresentados. A validação dos impactos foi conduzida com base nas variáveis de saída analisadas, que representam áreas-chave do processo SMT, incluindo a alocação de recursos, ajustes operacionais, ritmo de produção, conformidade de qualidade e intervenções necessárias.

Impactos Gerais da Logica Fuzzy nos Processos SMT

Os resultados apresentados validam o impacto positivo do sistema fuzzy na gestão de processos SMT em diversos níveis. Entre os benefícios destacados, estão:

- Decisões mais assertivas e bem fundamentadas: A lógica fuzzy fornece recomendações claras com base em regras bem definidas e dados de entrada reais.

- Redução de incertezas: O modelo fuzzy é capaz de lidar com a ambiguidade e incerteza inerentes aos sistemas produtivos, oferecendo orientações confiáveis.
- Otimização contínua: Ao identificar áreas críticas e propor ajustes específicos, o sistema contribui para a melhoria contínua do desempenho do SMT.
- Eficiência operacional: A alocação equilibrada de recursos e a manutenção de um ritmo de produção estável garantem uma maior eficiência operacional.

A validação dos impactos do sistema fuzzy no processo SMT demonstra que essa abordagem é altamente eficaz para lidar com a complexidade e incerteza de processos produtivos. As recomendações fornecidas pelo sistema resultam em ações estratégicas que melhoram a eficiência, qualidade e confiabilidade do SMT, posicionando-o como uma ferramenta indispensável para a gestão moderna da produção industrial.

V. Discussão

Os resultados apresentados destacam a eficácia do sistema fuzzy em interpretar variáveis complexas e gerar recomendações acionáveis. A partir das análises realizadas, os seguintes pontos merecem destaque:

- Flexibilidade na Tomada de Decisão: O sistema fuzzy demonstrou ser uma ferramenta robusta para lidar com incertezas inerentes aos processos SMT, fornecendo recomendações claras baseadas em regras bem definidas e condições reais de entrada.
- Identificação de Áreas Críticas: A capacidade do sistema em identificar ajustes necessários, como a prioridade de recursos e intervenções manuais, proporciona uma base sólida para ações corretivas e preventivas.
- Otimização Contínua: As recomendações, como ajustes operacionais significativos e manutenção de uma taxa de produção estável, refletem a capacidade do modelo em promover melhorias contínuas no processo SMT.
- Impacto na Qualidade: A análise da conformidade de qualidade destaca que, embora padrões sejam atendidos de forma moderada, o sistema identifica oportunidades para elevar o desempenho, garantindo um impacto positivo na percepção do cliente e na eficiência operacional.
- Sustentabilidade Operacional: Ao recomendar a estabilidade na taxa de produção e ajustes necessários nos parâmetros do processo, o modelo promove um equilíbrio entre eficiência e sustentabilidade, reduzindo desperdícios e otimizando o uso de recursos.

Os resultados discutidos apontam para uma aplicação promissora da lógica fuzzy em processos industriais, especialmente em sistemas SMT. No entanto, é importante considerar que a eficácia do sistema depende da qualidade das variáveis de entrada e das regras fuzzy definidas. Além disso, futuras implementações podem explorar modelos híbridos que integrem a lógica fuzzy com outras abordagens, como aprendizado de máquina, para potencializar ainda mais os resultados.

A discussão dos resultados valida a relevância do sistema fuzzy como ferramenta essencial para a gestão moderna de processos produtivos, promovendo decisões estratégicas, eficiência operacional e melhoria contínua.

VI. Conclusão

O presente estudo investigou a aplicação de um sistema baseado em lógica fuzzy para a otimização de processos de Montagem Superficial (SMT), com o objetivo de lidar com a complexidade e incertezas inerentes aos sistemas produtivos modernos. Os resultados obtidos demonstram que o modelo fuzzy é uma ferramenta robusta e eficaz para a tomada de decisão em diferentes aspectos do processo SMT, incluindo a priorização de recursos, ajustes operacionais, ritmo de produção, conformidade de qualidade e intervenções necessárias.

A lógica fuzzy possibilitou interpretar de maneira precisa as condições do processo por meio de variáveis de entrada representativas, como demanda de produção, capacidade operacional e desempenho de novos processos. As variáveis de saída defuzificadas mostraram recomendações claras, como a necessidade de ajustes significativos nos parâmetros operacionais (valor defuzificado de 7,74) e uma taxa de produção equilibrada (5,00), validando a capacidade do sistema de promover melhorias contínuas. Além disso, o modelo foi capaz de identificar áreas críticas, como a alta necessidade de intervenção no processo (7,74), e propor ações corretivas e preventivas com impacto direto na eficiência e qualidade.

Os resultados destacam que a lógica fuzzy não apenas fornece suporte à tomada de decisão, mas também contribui para a sustentabilidade operacional ao otimizar recursos, minimizar desperdícios e manter a estabilidade do processo produtivo. Esse equilíbrio é essencial para atender às demandas da produção moderna, que exige agilidade, eficiência e adaptabilidade em um ambiente de alta variabilidade.

Embora os resultados sejam promissores, é importante reconhecer que a eficácia do modelo depende diretamente da qualidade dos dados de entrada e do design das regras fuzzy. Estudos futuros podem explorar a integração da lógica fuzzy com outras abordagens, como aprendizado de máquina ou algoritmos de otimização, para aprimorar ainda mais os resultados e expandir sua aplicabilidade em diferentes cenários industriais.

Este trabalho demonstra que a lógica fuzzy é uma solução prática e poderosa para a gestão de processos SMT, permitindo a tomada de decisões assertivas e fundamentadas em condições reais. A adoção

dessa abordagem pode transformar significativamente a eficiência e a qualidade dos processos industriais, consolidando sua relevância no contexto da manufatura moderna e da Indústria 4.0.

Agradecimentos

Ao Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia, departamento Pós-Graduação em Engenharia, Processos, Sistemas e Gestão Ambiental - (PPG.EGPSA/ITEGAM).

Referencias

- [1]. Alkhoraif, Abdullah; Rashid, Hamad; Mclaughlin, Patrick. Lean Implementation In Small And Medium Enterprises: Literature Review. *Operations Research Perspectives*, V. 6, P. 100089, 2019.
- [2]. Cohen, Sandra; Naoum, Vassilios-Christos; Vlismas, Orestes. Intellectual Capital, Strategy And Financial Crisis From A Smes Perspective. *Journal Of Intellectual Capital*, V. 15, N. 2, P. 294-315, 2014.
- [3]. Császár, Ákos. Γ -Compact Spaces. *Acta Mathematica Hungarica*, V. 87, N. 1, P. 99-107, 2000.
- [4]. Dlodlo, Joseph Bhekizwe. Enterprise Resource Planning In Manufacturing Smes In The Vaal Triangle. 2011. Tese De Doutorado. North-West University. 2021.
- [5]. Dutta, Gautam Et Al. Digital Transformation Priorities Of India's Discrete Manufacturing Smes—A Conceptual Study In Perspective Of Industry 4.0. *Competitiveness Review: An International Business Journal*, V. 30, N. 3, P. 289-314, 2020.
- [6]. Eggers, Fabian. Masters Of Disasters? Challenges And Opportunities For Smes In Times Of Crisis. *Journal Of Business Research*, V. 116, P. 199-208, 2020.
- [7]. Johansson, Christoffer. How Lean Six Sigma Can Improve Predictability In An Industry 4.0 Perspective. Accessed On, V. 1, 2022.
- [8]. Kazakova, Elena; Lee, Joosung. Sustainable Manufacturing For A Circular Economy. *Sustainability*, V. 14, N. 24, P. 17010, 2022.
- [9]. Laureani, Alessandro; Antony, Jiju. Leadership And Lean Six Sigma: A Systematic Literature Review. *Total Quality Management & Business Excellence*, V. 30, N. 1-2, P. 53-81, 2019.
- [10]. Lee, Ching-Hung; Lin, Kai-Xiang; Chou, Che-Wei. Surrogate-Based Optimization Framework For Enhancing Smt Process Quality And Productivity In Electronics Manufacturing Services. 2024.
- [11]. Maglianesi, Sara. Business Model Innovation In Small Companies: The Case Of Design Italian Shoes. 2019.
- [12]. Mofolasayo, Adekunle Et Al. How To Adapt Lean Practices In Smes To Support Industry 4.0 In Manufacturing. *Procedia Computer Science*, V. 200, P. 934-943, 2022.
- [13]. Oztemel, Ercan; Gursev, Samet. Literature Review Of Industry 4.0 And Related Technologies. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, V. 31, N. 1, P. 127-182, 2020.
- [14]. Pessoa, Marcus Vinicius Pereira; Becker, Juan Manuel Jauregui. Smart Design Engineering: A Literature Review Of The Impact Of The 4th Industrial Revolution On Product Design And Development. *Research In Engineering Design*, V. 31, N. 2, P. 175-195, 2020.
- [15]. Rahimi, Fatemeh. Management Of Business Process Design In Global Implementation Of Enterprise Resource Planning Systems. 2016.
- [16]. Raja Santhi, Abirami; Muthuswamy, Padmakumar. Industry 5.0 Or Industry 4.0 S? Introduction To Industry 4.0 And A Peek Into The Prospective Industry 5.0 Technologies. *International Journal On Interactive Design And Manufacturing (Ijidem)*, V. 17, N. 2, P. 947-979, 2023.
- [17]. Slack, Nigel Et Al. *Administração Da Produção*. São Paulo: Atlas, 2009.