



CONTROLADOR INDUSTRIAL COM LÓGICA NEBULOSA APLICADA A EXTRUSORAS PARA FABRICAÇÃO DE PNEUS¹

INDUSTRIAL CONTROLLER WITH FUZZY LOGIC APPLIED
TO EXTRUDERS FOR MANUFACTURING OF TIRES

Wagner Comenale | WagnerComenale@hotmail.com | UNITAU

Filipe Wiltgen | ProfWiltgen@gmail.com.br | UNITAU | FATEC | IFSP

RESUMO

Esta pesquisa é aplicada em processos de automação e controle industriais utilizando como técnica de controle a lógica nebulosa. A utilização de sistemas de controle e automação com uso de técnicas de inteligência artificial na indústria abre caminho para a manufatura avançada (indústria 4.0) no âmbito nacional. O presente artigo tem como objetivo mostrar os avanços na pesquisa do desenvolvimento de um sistema de controle industrial baseado na técnica de lógica nebulosa (Fuzzy Logic) capaz de atuar em tempo real no controle de uma extrusora de parafuso na fabricação de pneus automotivos. Por se tratar de um processo considerado não linear, a construção de objetos de borracha por estar submetido a diferentes tipos de perturbações externas, o processo de extrusão depende do conhecimento intrínseco do operador nos operacionais das extrusoras. A pesquisa visa substituir o sistema de controle tradicional e atualmente manual por um sistema de controle em inteligência artificial autônomo industrial, que permite modelar matematicamente problemas complexos e não lineares através de regras simples de funções de pertinência implementadas em um algoritmo de controle implementado em um controlador lógico programável industrial. Esta pesquisa foi realizada em ambiente industrial, utilizando uma extrusora de parafuso simples com ~200mm de diâmetro destinada a fabricação de pneus automotivos. Este artigo apresenta o desenvolvimento e os resultados de um sistema de controle ininterrupto da velocidade do parafuso da extrusora, a fim de estabelecer um fluxo constante de borracha e indiretamente garantir a estabilização do peso final do produto extrudado, com variações inferiores a ~3% de variação em relação ao valor do peso ajustado permitindo a uniformidade na fabricação.

Palavras-chave: Manufatura Avançada. Extrusão. Fabricação de Pneus. Lógica Nebulosa. Sistemas de Controle e Automação.

ABSTRACT

This research is applied in automation and industrial control processes using fuzzy logic as a control technique. The use of control and automation systems with use of artificial intelligence techniques in industry paves way for advanced manufacturing (industry 4.0) nationwide. This article aims to show advances in research development an industrial control system based on the fuzzy logic technique capable of acting in real time in control of a screw extruder in manufacture of automotive tires. Because it is a process considered non-linear, construction of rubber objects is subject to different types of external disturbances, extrusion process depends on intrinsic knowledge of operator in extruder operators. The research aims to replace traditional and currently manual control system with an industrial autonomous artificial intelligence control system, which allows mathematically modeling complex and non-linear problems through simple rules of membership functions integrated into a control algorithm implemented in a controller Industrial programmable logic. This research was carried out in an industrial environment, using a single screw extruder with ~200mm in diameter aimed at manufacture of automotive tires. This paper presents development and results of an uninterrupted control system for extruder screw speed, in order to establish a constant and controlled flow of rubber, guaranteeing stabilization of final weight of extruded product, with variations of less than ~3% of variation in relation to adjusted weight value allowing uniformity in manufacturing.

Keywords: Advanced Manufacturing. Extrusion. Tire Manufacturing. Fuzzy Logic. Control and Automation Systems.

INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (ANIP), com cerca de 20 plantas fabris de 11 diferentes fabricantes que estão alocadas em território brasileiro foram responsáveis no ano de 2022 pela produção de ~56,5 milhões de pneus para diversos tipos de veículos.

O pneu é um dos componentes mais importantes do veículo, seu desempenho tem influência direta na segurança e dirigibilidade, basicamente por ser o único elo de contato entre o veículo e o solo. Aspectos como a frenagem, mudança de direção, estabilidade, aderência, conforto, redução do consumo de combustíveis e da emissão de gases poluentes são influenciados pela tecnologia empregada no desenvolvimento e na construção do pneu (WERLANG e SILVEIRA, 2013).

Atualmente alguns processos produtivos estão defasados tecnologicamente e realizados de forma manual implicando em um baixo nível de eficiência. Os procedimentos de controle operacionais são baseados nos conceitos heurísticos, os controles e processos realizados de forma manual, tem como características respostas lentas e personalizadas, pois dependem exclusivamente das habilidades de cada operador na execução dos ajustes necessários. Para o processo de produção de pneus, fatores climáticos, mudanças no processo produtivo ou variações nas características da

matéria-prima utilizada, influenciam o processo de fabricação dos pneus (COMENALE e WILTGEN, 2021; COMENALE e WILTGEN, 2022A e 2022B).

As diferentes percepções e experiências de cada operador evidenciam diferentes problemas e diferentes soluções as quais trazem peculiaridades inadmissíveis em um processo contínuo padronizado de produção com qualidade. A variação de método empregado na análise da situação problema e a latência na ação de controle tornam o processo lento e falho, e por este motivo, devem ser substituídas o quanto antes por sistemas de controle autônomos (SALES *et al.*, 2014; PREVIDI *et al.*, 2005).

Para substituir o modelo atual de fabricação manual, devem ser aperfeiçoados os processos produtivos através de novas técnicas e novos sistemas de controle automatizados, como esperado na utilização da Manufatura Avançada (MA). A substituição do operador humano no controle manual em máquinas do tipo extrusoras de borracha na fabricação de pneus automotivos será sem dúvida uma oportunidade para melhorar a repetibilidade e assertividade no processo produtivo (WILTGEN, 2020; COMENALE e WILTGEN, 2021).

A pesquisa aplicada realizada neste âmbito industrial tem o objetivo de substituir o controle manual, atualmente utilizado, por um modelo de controle baseado nos conceitos e técnicas de lógica nebulosa. O controle nebuloso, por sua vez, utiliza técnicas que reproduzem a forma humana de pensar, permite manusear informações qualitativas, esta técnica permite tratar dados imprecisos e incertos de forma autônoma e mais assertiva (GOMIDE e GUDWIN, 1994; JUNIOR *et al.*, 2020).

Ao submeter a extrusora de parafuso simples ao sistema controle nebuloso industrial deve atuar continuamente nos processos analisando os parâmetros e condições de regime normal de operação, e assim, definir estratégias que levem a táticas de controle mais eficazes a partir do entendimento dos dados obtidos ao longo do processo. Será possível estabelecer um sistema de controle que possua a melhor estratégia de ação baseando-se nos dados correspondentes às mudanças dos parâmetros físicos da matéria-prima e das condições do ambiente para construir uma ação de controle correspondente a cada parâmetro relevante para cada variável de controle.

Para isso foi implementado um controlador do tipo *MISO (Multiple Input, Single Output)* do tipo *Mandani* com base em lógica nebulosa para realizar o controle da pressão de saída do material extrudado, o estudo visa controlar a velocidade de rotação do parafuso da extrusora para

a estabilização da pressão de saída do processamento, este controle garantirá um fluxo contínuo da borracha extrudada pela matriz modeladora garantindo indiretamente a atenuação da variação no peso do produto extrudado, limitando as variações em +/-6% do peso total do produto extrudado a fim de se obter um controle eficiente e de fácil interação.

O sistema de controle utilizará os parâmetros mensurados pelos sensores dinamicamente no processo a fim de obter, como esperado, a eficiência na resposta do sistema de controle (ABEYKOON, 2016).

No transcorrer deste artigo, serão abordados os resultados obtidos a partir da implementação da pesquisa aplicada em lógica nebulosa industrial no controle da velocidade da extrusora a fim de garantir constante a pressão e fluxo de material extrudado para a fabricação de pneus automotivos.

O PROCESSO INDUSTRIAL DE MANUFATURA AVANÇADA

O governo alemão apresentou na Feira de *Hannover* inovações tecnológicas de 2011 baseadas em processos digitais altamente integrados e automatizados, consideradas como uma quebra de paradigma. Estas estratégias foram consideradas elementos essenciais para a implantação de fábricas tecnologicamente inteligentes e para isso devem priorizar a digitalização, conectividade e a automação, neste tripé são estabelecidas relações funcionais que otimizam os processos e agregam valor em diferentes aspectos no que tange o desenvolvimento de produtos, processos e gestão.

Além da Alemanha, Japão, EUA, Suíça, China e Coreia do Sul possuem programas estratégicos que visam alavancar a competitividade, capacidade industrial e também o desenvolvimento de novos processos e tecnologias, através da integração e do gerenciamento da produção a partir de um programa de atualização tecnológica. O objetivo é viabilizar a manufatura avançada (indústria 4.0), cada país deve integrar seus respectivos governos, com as indústrias, centro de pesquisas, universidades e investidores, para que juntos possam restabelecer um setor manufatureiro pujante (WILTGEN, 2020; COMENALE e WILTGEN, 2023).

Para se implementar um sistema inteligente baseado na manufatura avançada, deve-se ter uma arquitetura que contemple a utilização de tecnologias digitais integradas, tecnologia de nuvem, realidade aumentada, internet das coisas, robôs autônomos, banco de dados, simulações e manufatura aditiva, logo a introdução da manufatura avançada nas indústrias, pretende aliar

os conceitos de digitalização, conectividade e automação, com o objetivo de tornar os processos industriais mais eficientes, flexíveis e personalizados, (TROPIA *et al.*, 2017; ALBERTIN, 2017; MCT&I, 2017; MENDES *et al.*, 2017; PONTES e ARCURI, 2018; COMENALE e WILTGEN, 2021).

Os benefícios da aplicação da manufatura avançada para uma fábrica inteligente podem ser elencados:

- *Aplicar as tecnologias aos processos para uma maior flexibilidade e interdependência produtiva;*
- *Disseminar o conhecimento orientado para o resultado;*
- *Suprir a carência tecnológica com investimentos em pesquisa e desenvolvimento;*
- *Elevar a produtividade;*
- *Elevar a qualidade dos produtos e da mão de obra;*
- *Reduzir custos;*
- *Elevar os níveis de segurança.*

Na contramão do desenvolvimento, vários países ainda estão tecnologicamente obsoletos, o Brasil também possui muitos setores industriais que estão muito atrasados com relação à adoção de tecnologias digitais. A ausência de tecnologia e a falta de investimento é uma realidade que impossibilita a solução de problemas simples nos processos produtivos nacionais (VERMULM, 2018).

Dentre os diversos setores da indústria brasileira, o setor da borracha é muito abrangente, tem início com o cultivo e a extração do látex nas florestas, e se estende até indústrias que fabricam os produtos manufaturados. Tanto as indústrias de pequeno porte quanto as grandes indústrias possuem diversos maquinários, porém indubitavelmente as grandes indústrias possuem sistemas e maquinários mais complexos e modernos com elevados níveis de automatização dos seus sistemas de controle, o que permite a integração e a conectividade, as quais são premissas para a manufatura avançada.

Especificamente as indústrias de pneus, tanto as nacionais quanto as multinacionais, estão igualmente defasadas tecnologicamente, justifica-se a defasagem tecnológica, aos longos períodos sem investimentos no segmento tanto para a manutenção quanto para a atualização tecnológica das máquinas, equipamentos e dos processos industriais.

Atualizar tecnologicamente e automatizar as máquinas e equipamentos através de modernos dispositivos e sistemas de controle, uso de sensores para a integração dos processos através de redes de comunicação e a conectividade do ambiente industrial com o ambiente corporativo (BENTO e MALAGUTTI, 2020).

A consolidação dos processos de integração de sistemas e utilização de controles, sensores e atuadores eletrônicos podem vir a estabelecer uma estratégia dentro dos conceitos da manufatura avançada, para alavancar e reposicionar a indústria brasileira (WILTGEN, 2020; ARBIX *et al.*, 2017; COMENALE e WILTGEN, 2021).

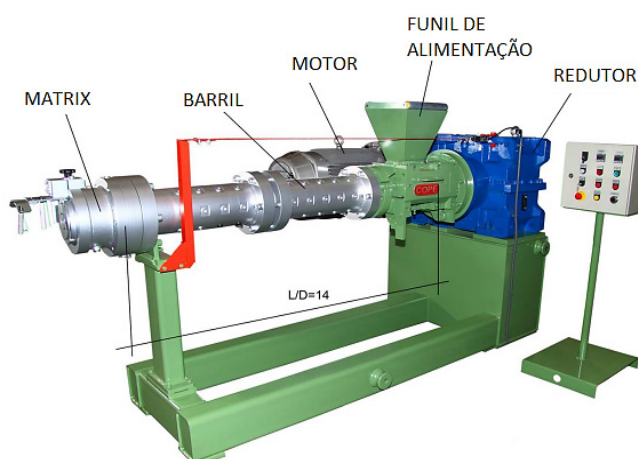
EXTRUSORAS DE BORRACHA NA INDÚSTRIA

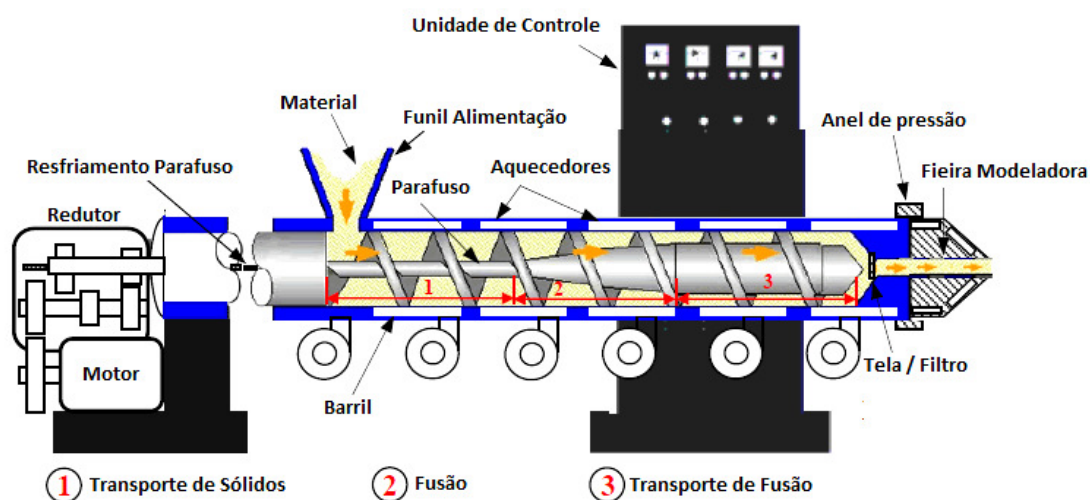
Considerado um sistema versátil, de elevada produtividade e de baixo custo de operação e manutenção, o equipamento denominado como extrusora é considerado um processo de manufatura importante na indústria de fabricação e transformação de borracha, o princípio fundamental de funcionamento do processo de extrusão de borracha consiste basicamente é a conversão de uma matéria-prima inicialmente no estado sólido em uma massa fluída, basicamente pela aplicação de calor e transformação mecânica.

Seu funcionamento consiste em forçar a passagem de uma massa de elastômero pelo barril da extrusora, utilizando um parafuso sem fim, o objetivo é obter na saída da extrusora um perfil de material extrudado com dimensões definidas por uma feira modeladora ou matriz de extrusão (SANTOS *et al.*, 2010; RAUWENDAAL, 2013; SILVA *et al.* 2014; SALES *et al.*, 2014; QUELHO, 2018).

A extrusora de borracha é constituída de um corpo cilíndrico oco, comumente chamado de barril. No interior do barril está posicionado o parafuso sem fim, acoplado a um sistema de redução mecânica tracionado por um motor elétrico. Deste modo a extrusão da borracha ocorre pelo movimento de rotação da rosca presente no parafuso. As partes que compõem uma extrusora podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 | Componentes básicos de uma extrusora de parafuso.





Fonte: Adaptado parte de Comenale (2023) e Mahto e Murmu (2015).

Conforme pode ser visto na Figura 1, o parafuso está localizado no interior do corpo da extrusora e está dividido basicamente em três zonas funcionais geometricamente distintas. A primeira zona funcional é conhecida como zona de alimentação, o canal do parafuso possui uma maior profundidade proporcionando uma maior área para a recepção da matéria-prima no estado sólido.

A segunda zona funcional é chamada de zona de fusão, é a responsável pela fundição da borracha, e por fim, a terceira zona funcional que é chamada de zona de compressão, no qual o parafuso helicoidal possui uma profundidade reduzida, causando assim a compressão do material no canal do parafuso contra a feira modeladora, sob determinada pressão a ser controlada (ABEYKOON, 2016; RAUWENDAAL, 2013; SANTOS *et al.*, 2010).

Basicamente o funcionamento da extrusora ocorre pelo abastecimento da matéria-prima, através de um transportador que conduz ao interior da extrusora através de um funil de alimentação, que direciona o material para o interior do barril na zona de alimentação do parafuso helicoidal. O transporte, processamento e compressão da matéria-prima ocorre pelo movimento rotacional do parafuso helicoidal sob comando de um painel elétrico que controla a velocidade de um motor elétrico, conforme as exigências de cada processo.

A geometria construtiva da hélice do parafuso helicoidal provoca um aumento gradativo do atrito mecânico, do cisalhamento, aquecendo e homogeneizando a massa de borracha. Nesse momento ocorrem transformações termomecânicas que provocam alterações nas propriedades físicas do material (MAHTO e MURMU, 2015; QUELHO, 2018).

Por fim, o parafuso helicoidal pressiona a massa de borracha fundida contra uma feira modeladora, ao transpassar a feira modeladora a massa de borracha fundida assume o formato geométrico definido pela mesma (SALES *et al.*, 2014).

O processo de extrusão é complexo, a borracha sofre complexas transformações termomecânicas que induzem fortes mudanças físico-químicas em suas propriedades, além disso a extrusora de borracha constantemente submetida a diferentes tipos e níveis de perturbações onde ocorrem variações que afetam o processo, provocando instabilidade no fluxo da matéria-prima extrudada e conseqüentemente reproduzindo efeitos indesejáveis na qualidade do produto fabricado (PREVIDI *et al.*, 2005).

Por ser um sistema de controle tipicamente manual, o processo de extrusão de borracha deve estar apto a sofrer intervenções que incidam em ajustes específicos no controle do seu processo. A demanda por este tipo de controle requer a presença de operadores especialistas que tenham experiência e habilidade para realizar as correções.

A inoperância ou a lentidão na execução do controle manual do processo, culminam em elevados volumes de produtos fabricados fora das especificações de operação, acarretando o reprocessamento dos materiais em outras máquinas ou até mesmo o completo descarte, mas também o consumo adicional de recursos como água e energia elétrica e por conseqüência a elevação dos custos operacionais de fabricação dos produtos.

A qualidade do material extrudado está atrelada a velocidade da resposta do sistema de controle, garantir o fluxo constante do material fundido é o principal parâmetro a ser monitorado e controlado. A manutenção de um fluxo constante da borracha derretida garante uma vazão constante do material, depende do monitoramento e controle de variáveis de processo como temperatura, velocidade, pressão de saída do material, relação e a viscosidade da matéria-prima, caracterizada pelo comportamento não newtoniano da borracha (ABEYKOON, 2014A; ABEYKOON, 2014B ABEYKOON, 2016; COMENALE e WILTGEN, 2021; LEÃO e ANDRADE, 2018; RAUWENDAAL, 2013).

O processo de extrusão é complexo, não só pelas perturbações no qual está submetido, mas também por ser manualmente controlado, o processo de extrusão implica em uma grande dificuldade para o operador humano. Basicamente, para que se tenha um sistema de controle

eficiente é necessário migrar o processo de controle do modo manual para um sistema de controle automatizado baseado a partir de estratégias de controle baseadas em sistemas inteligentes e na manufatura avançada, para que seja possível obter ações de controle rápidas e assertivas elevando a qualidade do produto extrudado.

Por produzir diferentes partes do pneu, o processo de extrusão de borracha é uma etapa que tem forte impacto qualitativo no produto, durante o processo de fabricação do pneu, faz-se necessário eliminar ou minimizar a maioria das interferências que implicam em alterações nas principais características dimensionais do produto extrudado final, largura, espessura e peso (LEÃO e ANDRADE, 2018; COMENALE e WILTGEN, 2021; COMENALE *et al.*, 2022).

A análise individual de cada uma destas variáveis no processo produtivo tem como objetivo evidenciar o nível de interferência para a implementação da Manufatura Avançada (MA) na indústria de borracha. Além das perturbações que ocorrem durante o processo de extrusão, outro fator importante a ser considerado é a dificuldade para um operador humano ser eficiente no controle deste tipo de máquina, nesse processo ajustes são frequentes e requer velocidade e assertividade nas respostas. A ineficiência do controle pode gerar centenas de quilos de borracha extrudada a ser descartada dado a não conformidade de requisitos. Isso ocorre até que todos os ajustes manuais sejam realizados pelos operadores e a produção seja estabelecida.

SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO INDUSTRIAL PARA EXTRUSORA DE BORRACHA

Na teoria de sistemas de controle, um sistema é representado por um modelo matemático que retrata uma situação real. No âmbito da engenharia os sistemas de controle estão divididos em sistemas lineares e sistemas não lineares ou complexos. Na teoria de controle clássica, para se implementar um modelo matemático é necessário conhecer detalhadamente o processo a ser controlado, o que nem sempre é factível em sistemas não lineares ou complexos (COMENALE *et al.*, 2022).

Diferentemente da lógica clássica, a lógica nebulosa opera com conceitos inexatos ou de imprecisão, sua utilização é indicada para condições de ambiguidade de modelos matemáticos ou na tratativa de fenômenos empíricos. Deste modo a lógica nebulosa é adequada para o tratamento dos dados tanto no âmbito objetivo quanto no subjetivo, possibilitando a modelagem de sistemas complexos e não-lineares somente pela experiência de operadores especialistas através de métodos

baseados na linguagem natural do ser humano (GOMIDE *et al.*, 1995; BILOBROVEC *et al.*, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2010; SAMPAIO *et al.*, 2007; CAMBOIM *et al.*, 2014).

Por se tratar de um sistema complexo, o processo de extrusão de borracha, impõem aos operadores humanos várias dificuldades para realizar ajustes manuais de forma eficaz e eficiente. Isso demonstra ser importante a utilização de um sistema de controle automatizado na extrusora, preferencialmente capaz de lidar com múltiplas variáveis não-lineares baseados em um sistema de lógica nebulosa (SELLITTO, 2002; BILOBROVEC *et al.*, 2004; SAMPAIO *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2010; ABEYKOON, 2016).

O processo de *fuzzificação* utiliza entradas incertas e imprecisas, as quais são atribuídos valores referentes aos graus de pertinência a partir de uma função de pertinência para este sistema. Para obter o sinal de controle nebuloso o controlador nebuloso necessita realizar o processo de *defuzzificação*. Esta etapa fornece a saída do controlador um único valor real que represente os valores nebulosos (CAMBOLM *et al.*, 2014; JUNIOR *et al.*, 2020).

Os parâmetros da extrusora em teste são: ~200mm de diâmetro, vazão de ~30kg/min, temperatura de processamento de ~125°C, velocidade de rotação máxima de ~20 RPM, motor trifásico de corrente alternada com potência de ~400 HP e velocidade nominal de até ~1.150 RPM. O algoritmo de controle nebuloso foi implementado em um controlador industrial modelo *Allen-Bradley* do tipo *1756L61* com Processador *Controllogix 5561 1756L61* (2MBytes de memória RAM).

Dentre as variáveis monitoradas, para medir a pressão de saída do material extrudado pela fiação modeladora foi utilizado um transdutor de pressão modelo *DYNA-4-3.5C-15/46* (medição de 0 a ~350 bar, sinal de saída 0-10V e sensibilidade de ~30mV/bar). O sensor para a medição da temperatura ambiente foi o modelo *RH T-WM TRANSMITTER* (operação de -10°C à +65°C e sinal de saída analógico de 4-20mA). Os valores medidos da viscosidade de amostras da matéria-prima, foram obtidos com o viscosímetro modelo *MV2000* (medição de 0 a 99 *Mooney*).

Nesta pesquisa foram monitoradas as variáveis pressão, temperatura e viscosidade a fim de permitir o controle suave de velocidade da extrusora com o objetivo de manter constante a pressão de saída do material extrudado, e conseqüentemente o seu fluxo, para que não ocorra variações que influenciem a qualidade do produto fabricado.

SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO INDUSTRIAL PARA EXTRUSORA

A primeira etapa do sistema de inferência nebulosa é o processo conhecido como *fuzzyficação*, ou seja, a escolha das funções de pertinência relacionadas para todas as variáveis de entrada e saída pertencentes ao sistema de interesse no qual cada variável terá um grau de pertinência para cada uma das funções existentes (COMENALE *et al.*, 2022).

Note que para manter constante o fluxo do material de borracha produzido na extrusora a velocidade da mesma é controlada pela variação da pressão de saída do material fabricado. Assim sendo, é necessário o monitoramento da pressão de saída, temperatura ambiente, viscosidade da matéria-prima, entre outras. Cada qual representada por funções de pertinência, curvas que representam o grau de relação com cada variável (COMENALE e WILTGEN, 2023).

As variáveis de entrada, pressão, temperatura e viscosidade serão monitoradas e convertidas em variáveis nebulosas através do processo de *fuzzyficação*. Neste processo as variáveis de entrada se transformam em variáveis nebulosas determinadas por funções de pertinência.

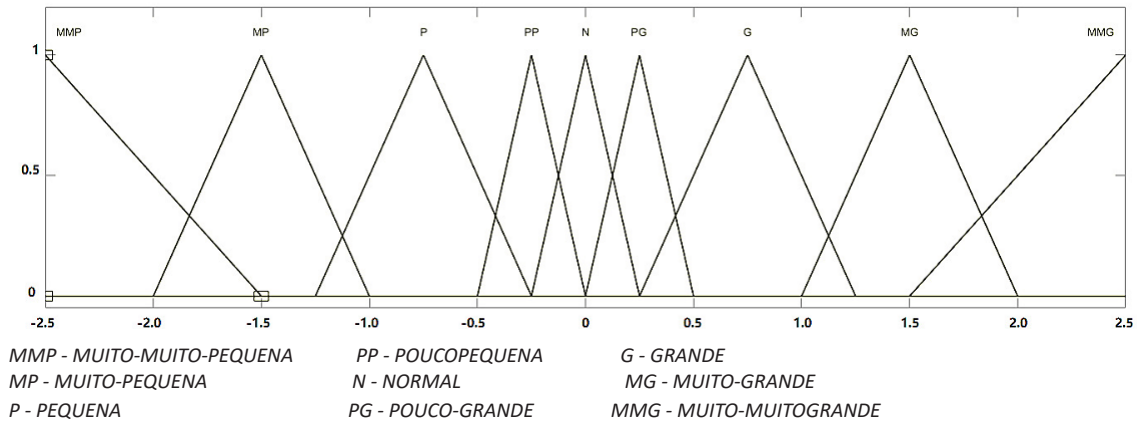
Cada função de pertinência caracteriza um conjunto que por natureza não é binário, e assim, permite a interação entre outros conjuntos. Isso determina o grau de pertinência de cada variável para cada conjunto, mostrando o nível de inferência de cada variável com diferentes pertinências para cada conjunto de curvas (COMENALE *et al.*, 2022).

Quanto mais curvas de pertinência, mais conjuntos, e maior a relação de pertinências de uma variável com diversos conjuntos, e desta forma pode se determinar quanto uma variável pertence a cada conjunto, com maior ou menor intensidade, mas sempre difusa e nunca binária.

Essa é a base da técnica de Lógica Nebulosa, no qual uma variável pode pertencer a diversos conjuntos com diversos pesos (pertinências) conforme os ajustes do projetista do sistema, e sempre em conformidade com o que é observado do efeito físico real, transcrito na forma de um conjunto de variáveis dentro de determinada regras.

Na Figura 2 é possível verificar as funções de pertinência para a pressão da extrusora em teste neste sistema de controle nebuloso industrial.

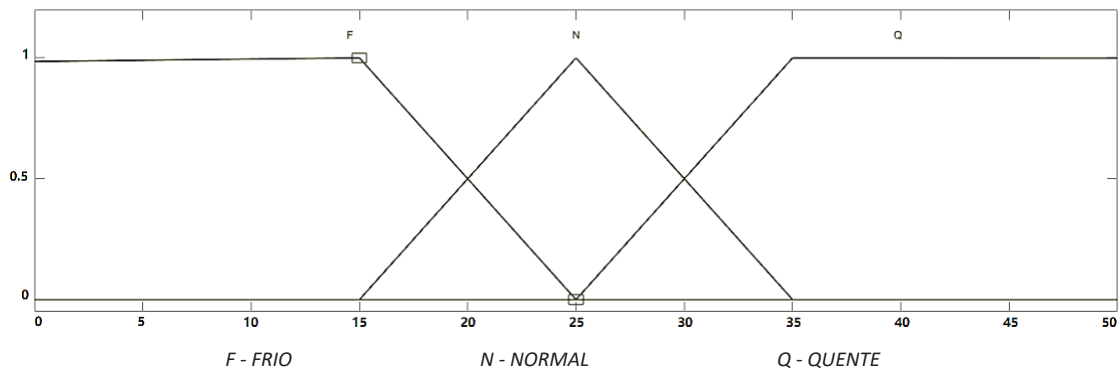
Figura 2 | Funções de pertinência para a pressão de saída material da extrusora.



Fonte: Próprios Autores (2023).

Para o controle da temperatura foi determinada uma faixa de $\sim 0^{\circ}\text{C}$ à $\sim 50^{\circ}\text{C}$, pois todos os valores de temperatura ambiente monitorados durante a realização da pesquisa estão contemplados nessa faixa operacional. As funções de pertinência são do tipo triangular, e definida com três curvas, como pode ser visto na Figura 3.

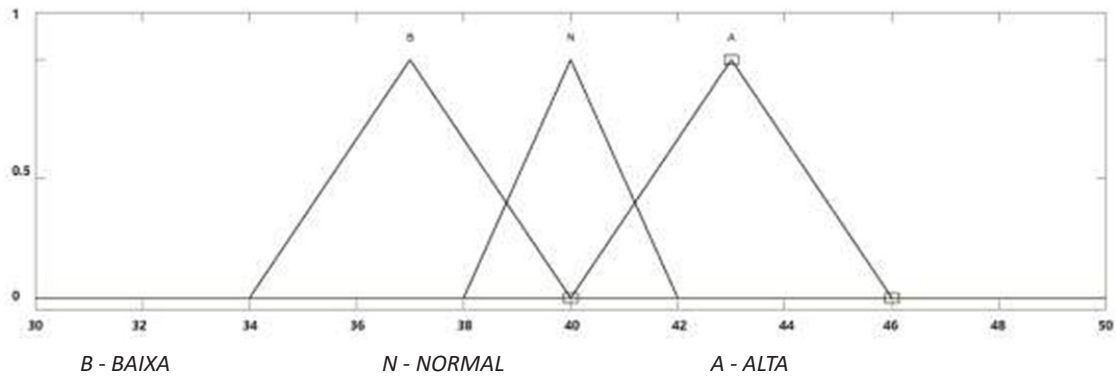
Figura 3 | Funções de pertinência para a temperatura ambiente.



Fonte: Próprios Autores (2023).

Para determinar a viscosidade de uma borracha (elastômero puro ou de uma composição não vulcanizada), avalia-se a sua resistência ao cisalhamento, para isso é utilizado o viscosímetro *Mooney*. Diferentes amostras, são coletadas entre os lotes de materiais e estas são submetidos aos testes de laboratório, para que se obtenha as medições referentes a viscosidade dos lotes a serem utilizados no processo. (GUERRA *et al.*, 2004). O valor de cada corpo de prova registrado pelo viscosímetro, é agrupado e estes valores servem como referência para delimitar a função de pertinência e sua interferência no controle do fluxo do material extrudado. Na Figura 4 observa-se a função de pertinência do tipo triangular.

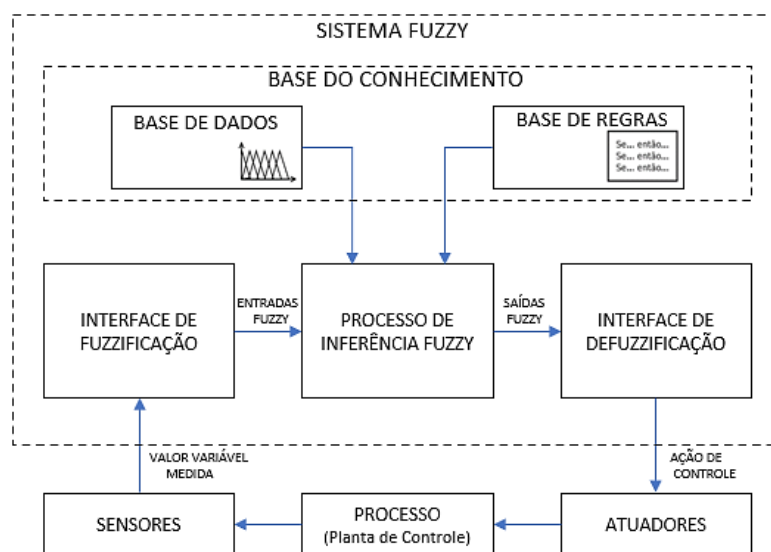
Figura 4 | Funções de pertinência para a pressão de saída material fabricado.



Fonte: Próprios Autores (2023).

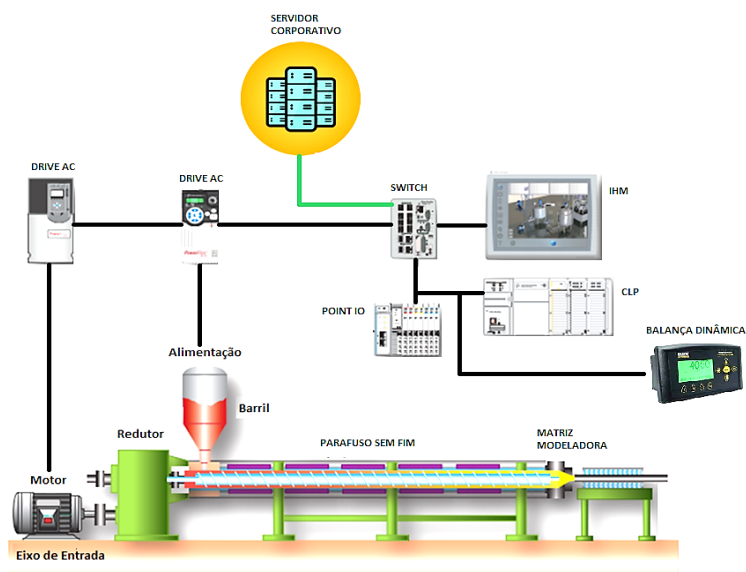
O modelo de controle proposto implementado na técnica de Lógica Nebulosa foi do tipo *Mandani* (SIMÕES e SHAW, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2010). Cada variável utilizada impõe ao sistema de controle diferentes níveis de inferências, que por este motivo, se relacionam com as regras em conjunto com os valores de pertinência para cada variável, e desta forma se traduzem e realizam o controle de velocidade da extrusora. A cada alteração do valor das variáveis monitoradas, o sistema de controle nebuloso percebe a mudança e gerencia o controle de velocidade da extrusora com o objetivo de manter a pressão e o fluxo do material na saída sempre constante. Na Figura 5 pode ser visto o diagrama do controlador nebuloso e verificar que o mesmo possui realimentação do tipo malha fechada. Na sequência é possível ver uma ilustração do controle nebulosos industrial desenvolvido nesta pesquisa.

Figura 5 | Controle nebuloso implementado na extrusora para a fabricação de pneus.



Fonte: Próprios Autores (2023).

Figura 6 | Ilustração do controle nebuloso industrial para fabricação de pneus.



Fonte: Próprios Autores (2023).

Observe que a variação da pressão de saída do material pode assumir valores positivos ou negativos, conseqüentemente isto modifica o comportamento do funcionamento do motor da extrusora, podendo diminuir ou aumentar a velocidade sempre que necessário via um inversor de frequência industrial.

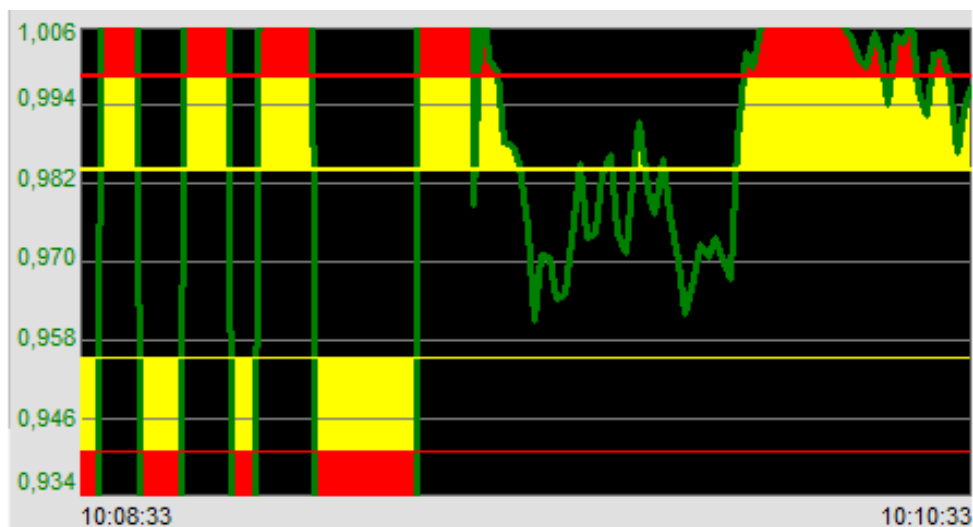
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes sistema de controle nebuloso industrial, foi executado com o equipamento em regime de operação. Inicialmente a extrusora operou sem a interferência do sistema de controle nebuloso, ou seja, ele estava desativado. O comportamento da extrusora sob estas condições pode ser visto na Figura 7.

Nota-se que a extrusora possuía um comportamento instável, ao longo do processo de extrusão, pois o peso do material fabricado apresentou variações acima dos valores admissíveis para o controle da qualidade do produto fabricado.

Os distúrbios nesta operação mostram que é difícil ajustar o controle da extrusora para as variações ocasionadas no processo de fabricação ao longo do tempo. Operadores humanos gastam muito tempo, recursos e matéria-prima até encontrar uma “receita” que funcione para as condições de operação naquele exato momento, e por poucas horas.

Figura 7 | Sinais de da extrusora com o sistema de controle nebuloso desligado.

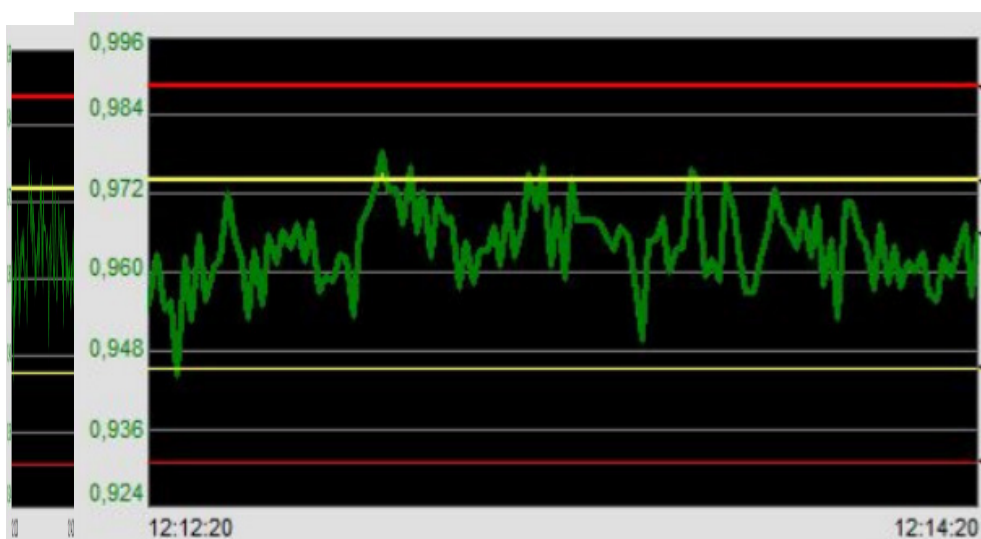


Fonte: Próprios Autores (2023).

É possível notar que as acelerações e desacelerações do processo de fabricação sempre ultrapassam os valores limites ajustados para a fabricação ideal, o que requer uma atuação constante do operador humano na máquina e um esforço na atuação do motor acelerando ou não o processo de forma não linear.

Quando o sistema de controle nebuloso industrial desenvolvido nesta pesquisa é acionado (Figura 8), notem que o comportamento do processo de funcionamento da extrusora entra em um estado de equilíbrio dinâmico, muito diferente do que ocorre quando ele não está operando (Figura 7). É possível notar na Figura 8 que a operação não ultrapassa os limites admissíveis (região na cor vermelha acima ou abaixo de 1,0).

Figura 8 | Sinais de da extrusora com o sistema de controle nebuloso ligado.



Fonte: Próprios Autores (2023).

Esta diferença significativa do comportamento entre um sistema controlado manualmente (Figura 7), e o sistema com o controlador nebuloso industrial (Figura 8), mostra o porquê devem ser empregados sistemas de controle para a operação de máquinas no qual o comportamento de funcionamento é não linear e complexo, seres humanos não são tão ágeis em controlar o tempo todo um processo industrial.

O controlador nebuloso industrial se mostrou muito estável e confiável, principalmente devido à variedade de produtos produzidos ao qual o sistema de controle se adaptou e conseguiu atender todas às especificações na fabricação exigidas para pneus de qualidade.

Ao utilizar um conjunto de regras coerentes e funções de pertinência adequadas, a lógica nebulosa se mostrou altamente eficaz para o controle da pressão de saída do material extrudado a partir da velocidade do parafuso da extrusora. A aplicação de técnicas de controle tradicionais nem sempre funcionam bem em sistemas complexos ou não lineares.

Além disso, foi simples implementar esta solução, não houve a necessidade de modelar o sistema a ser controlado, pois foram considerados e incorporados nos sistemas de controle os conhecimentos heurísticos dos operadores do processo em valores de pertinência, isso associado as medidas de entrada e sistemas de controle industriais possibilitaram chegar a um sistema de controle adequado para a variação de massa de borracha (convertida em peso) para a fabricação dos pneus nesta indústria.

O inversor de frequência utilizado no processo possui diversas parametrizações específicas para este processo. Entretanto, nesta pesquisa este foi programado apenas com as configurações básicas de funcionamento, o controlador de automação programável por sua vez, por possuir alta velocidade de processamento permitiu alterar de forma rápida e eficiente a atuação da velocidade do motor. Mesmo sabendo que o sistema de controle nebuloso é quem de fato possui a maior influência no controle deste processo industrial, ambos dispositivos interferem na resposta do sistema de controle, a substituição destes dispositivos pode alterar a resposta final do sistema de controle, podendo melhorar seu desempenho ou reduzir o mesmo.

Foi constatado que o controlador nebuloso industrial pode ajustar a pressão de saída de forma muito eficiente, pois garantiu que o peso do material extrudado não ultrapassasse os limites

qualitativos especificados máximos de ~3%.

Assim sendo, pode-se concluir que a aplicação com base na teoria nebulosa de controle teve êxito no desenvolvimento deste controlador, tendo em vista os bons resultados obtidos.

Além disso, a praticidade e confiabilidade ao aplicar a técnica de inteligência artificial em conjunto com o conhecimento do processo, dados de sensores e equipamentos eficazes de controle de velocidade industrial, deve ser considerada como avanço tecnológico por obter uma significativa melhora de desempenho do sistema complexo como a extrusão de borracha. A redução dos índices energéticos, a redução no consumo de matéria-prima e o aumento da disponibilidade da máquina, permitiu aumentar o volume de produção e a diminuição de desperdícios no processo produtivo utilizado nesta pesquisa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi evidenciado que o controle manual do processo de extrusão de borracha para a fabricação de pneus automotivos possui limitações significativas em relação ao sistema de controle nebuloso industrial desenvolvido. A automatização do processo através de um sistema de controle capaz de controlar o fluxo de saída do material extrudado de forma mais estável e reduzindo cerca de ~50% a amplitude das variações admissíveis no peso do produto final fabricado é sem dúvida um indicativo de que o controle funciona com eficiência.

Deste modo, conclui-se que houve êxito nos resultados do sistema de controle nebuloso industrial proposto para a pesquisa. Além disso, o desenvolvimento do modelo de controle nebuloso é de fácil compreensão e não depende de conhecimentos matemáticos avançados, o que possibilita a continuidade das melhorias no sistema implantado por outros técnicos e engenheiros.

A utilização deste modelo de sistema de controle nebuloso industrial agrega e integra tecnologias tradicionais e usuais nos processos produtivos comuns na indústria, sendo uma abordagem muito promissora para o aperfeiçoamento de inúmeros processos industriais complexos, cujos dispositivos similares podem reduzir os desperdícios de matéria-prima, insumos e recursos.

A utilização deste sistema de controle nebuloso na indústria de fabricação de pneus, pode vir a se tornar um caso importante de estudo para a implementação de sistemas de controle baseados em técnicas de inteligência artificial em diversos setores diferentes da indústria.

REFERÊNCIAS

- ABEYKOON, C.A. Novel Soft Sensor for Real-Time Monitoring of the Die Melt Temperature Profile in Polymer Extrusion. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. v.61(12)12, p.7113-7123, 2014A.
- ABEYKOON, C.A. Novel Model-Based Controller for Polymer Extrusion. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**. v.22(06), p.1413-1430. 2014B.
- ABEYKOON, C.A. Single Screw Extrusion Control: A Comprehensive Review and Directions for Improvements. **University of Manchester**. v.1, p. 1-13. 2016.
- ALBERTIN, M.R., ELIENESIO, M.L.B., AIRES, A.S., PONTES, H.L.J. e JÚNIOR, D.P.A. Principais Inovações Tecnológicas da Indústria 4.0 e suas Aplicações na Manufatura. **XXIV Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP2017**. Bauru, 08-10 de novembro, p.01-13, 2017.
- ARBIX, G., SALERNO, M.S., ZANCUL, E., AMARAL, G. e LINS, L.M. O Brasil e a Nova Onda de Manufatura Avançada. **Centro Brasileiro de Análise e Planejamento**. v.36(03), p.29-49, 2017.
- BENTO, A.R. e MALAGUTTI, T.F. Aplicação da Indústria 4.0 como Forma de Melhoria nos Processos de Manufatura no Setor Automotivo. **Revista Linguagem Acadêmica**. v.10(01), p.09-27, 2020.
- BILOBROVEC, M., MARÇAL, R.F.M. e KOVALESKI, J.L. Implementação de um Sistema de Controle Inteligente Utilizando a Lógica Fuzzy. **XV Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia de Processos**. Bauru, 06-08 de novembro, p.01-07, 2004.
- CAMBOLM, W.L.L., SILVA, S.A. e GOMES, H.P. Aplicação de Técnicas Fuzzy no Controle de Pressão em Sistemas de Abastecimento de Água. **Revista Eng. Sanitária Ambiental** v.19(01), p.67-77, 2014.
- COMENALE, W. e WILTGEN, F. Automação Industrial para a Manufatura Avançada com Apoio da Engenharia de Sistemas & Requisitos. **11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Curitiba, 26-24 de maio, p.01-08, 2021.
- COMENALE, W. e WILTGEN, F., Controlador Nebuloso para Extrusoras de Borracha. **XI CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Teresina, 07-11 de agosto, p.01-10, 2022A.
- COMENALE, W. e WILTGEN, F., Controlador Nebuloso Aplicado na Fabricação de Pneus. **XI CICTED - Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento**. 18-20 de outubro, p.01-18, 2022B.
- COMENALE, W., WILTGEN, F. e ALMEIDA, L.F., Lógica Nebulosa para o Controle de Extrusoras de Parafuso Simples Aplicada ao Processo de Fabricação de Pneus. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**. v.01(01), p.01-21, 2022.
- COMENALE, W. e WILTGEN, F. Inteligência Artificial Aplicada na Fabricação de Pneus - Um Caminho para a Manufatura Avançada. **12º Congresso Brasileiro de Fabricação**. Brasília, 10-12 de maio, p.01-10, 2023.
- GOMIDE, F.A.C. e GUDWIN, R.R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. **SBA Controle & Automação**. v.4(03), p.97-115, 1994.
- GOMIDE, F.A.C., GUDWIN, R.R. e TANSCHKEIT, R. Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações. **Proc. 6th IFSA Congress – Tutorials**. São Paulo, XX-XX julho, p.01-38, 1995.
- GUERRA, B.B., FURTADO, C.R.G. e COUTINHO, F.M.B. Avaliação Reológica de Elastômeros e suas Composições. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v.14(04), p.289-294, 2004.
- JUNIOR, M.A.B., SOARES, V.A., GONÇALVES, G.J.C., MUNHOZ, M.R., DIAS, L.G., BARBARA, G.V. e BREGANON, R. Implementação de um Controlador Fuzzy para Controle de Temperatura. **Brazilian Journal of Development**. v.6(06), p.38231-38245, 2020.
- LEÃO, N.S.M.S. e ANDRADE, J.J.O. Aplicação da FMEA a Análise de Falhas em um Equipamento de Trefilagem para

- Estabelecimento de Estratégias de Manutenção: Estudo de Caso. **Revista Espacios**. v.36(08), p.01-10, 2015.
- MAHTO, P.K. e MURMU, R. Temperature Control for Plastic Extrusion Process. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**. p.5748-5658, 2015.
- MCT&I. Plano de CT&I para Manufatura Avançada no Brasil. **Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC**. Brasília. 2017. 68p.
- MENDES, C.R., SIEMON, F.B. e CAMPOS, M.M. Estudo de Caso da Indústria 4.0 Aplicados em uma Empresa Automobilística. **Pós-Graduação em Revista**. v.1(04), p.15-25, 2017.
- OLIVEIRA, D.N., BRAGA, A.P.S. e ALMEIDA, O. M. Fuzzy Implementado em Ladder com Funções de Pertinência Descontínuas. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**. Bonito, 12-16 de setembro, p.411-416, 2010.
- PONTES, J. e ARCURI, A.S.A. A Manufatura Avançada entre Dois Extremos. **Revista Administracion Publica y Sociedad**. v.01(05), p.26-37, 2018.
- PREVIDI, F., SARAVESI, S. e PANAROTTO, A. Design of a Feedback Control System for Real-Time Control of Flow in a Single-Screw Extruder. **16th Triennial World Congress**. Praga, 03-08 July, p. 1111-1121, 2005.
- QUELHO, P.E.Q. **Desenvolvimento de Extrusora Experimental e Software para Controle e Supervisão das Variáveis de Extrusão do ABS**. 150f. Dissertação de Mestrado no Centro Universitário de Volta Redonda. 2018.
- RAUWENDAAL, C. Polymer Extrusion. Editora Munich, 2013. 934p.
- SALES, J.C., SANTOS, M.C., BRANDÃO, F.S., BRAGA, W.A., MORAIS, J.E.V., SALES, A.J.M. e SOMBRA, A.A. Extrusão na Indústria de Cerâmica Vermelha no Ceará. **58º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Bento Gonçalves, 18-21 maio, p.01-11, 2014.
- SAMPAIO, L.M.D., OLIVEIRA, M.J.F. e IGNACIO, A.A.V. Lógica Nebulosa: Aplicações e Tendências. Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. **Marinha do Brasil**, p.01-15, 2007.
- SANTOS, D.M., BUKZEM, A.L., COUTINHO, N.D., ASCHERI, J.L.R. e ASCHERI, D.P.R. Principais Considerações da Extrusão Termoplástica de Alimentos. **Revista Processos Químico**. v.1, p.38-44, 2010.
- SELLITTO, M.A. Inteligência Artificial: Uma Aplicação em uma Indústria de Processo Contínuo. **Gestão & Produção**. v.9(03), p.363-376, 2002.
- SILVA, M.L., SANTOS, L. e CHOUPINA, A. A Extrusão em Tecnologia Alimentar: Tipos, Vantagens e Equipamentos. **Revista de Ciência Agrária**, v.38(01), p.03-10, 2014.
- SIMÕES, M.G. e SHAW, I.A. Controle e Modelagem Fuzzy. **Editora São Paulo**. 2007. 186p.
- TROPIA, C.E.Z., SILVA, P.P. e DIAS, A.V.C. Indústria 4.0: Uma Caracterização do Sistema de Produção. **XVII Congresso Latino-Ibero-americano de Gestión Tecnológica**. Cidade do México, 16-18 october, p.1-14, 2017.
- VERMULM, R. Políticas para o Desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil. **Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial -IEDI**. São Paulo. 2018. 31p.
- WERLANG, R.B. e SILVEIRA, F.L. A Física dos Pneumáticos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v.30(03), p.614-627, 2013.
- WILTGEN, F. A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada. **Revista Tecnologia**. v. 41, n. 2, p. 1-11. 2020.