


LÓGICA NEBULOSA PARA O CONTROLE DE EXTRUSORAS DE PARAFUSO SIMPLES APLICADA AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PNEUS

FUZZY LOGIC FOR CONTROL OF SINGLE SCREW EXTRUDERS APPLIED TO TIRE MANUFACTURING PROCESS

Wagner Comenale¹ 

Filipe Wiltgen² 

Luis Fernando de Almeida³ 

Resumo: Este artigo apresenta a pesquisa referente ao desenvolvimento de um sistema de controle inteligente baseado na técnica de lógica nebulosa para utilização em uma extrusora de borracha na fabricação de pneus automotivos. O sistema de controle atua diretamente na pressão de saída do material extrudado de uma extrusora do tipo parafuso simples. O estudo foi realizado em ambiente industrial em uma extrusora de borracha com ~200mm de diâmetro utilizada na fabricação de pneus automotivos. A análise de diferentes variáveis do processo de extrusão permitiu estabelecer diferentes regras e funções de pertinência para o controle do sistema nebuloso. O sistema de controle nebuloso garante o fluxo constante do material extrudado através do controle da velocidade do parafuso da extrusora, garantindo desta forma, a estabilização do peso final do produto extrudado. Este comportamento estável garante não só níveis aceitáveis de peso do produto extrudado, mas também, reduz significativamente a perda de matéria-prima, assim como, as variações na qualidade no processo de fabricação de pneus na indústria automotiva.

¹Engenheiro Eletricista, Mestrando em Dinâmica e Sistemas de Controle na Universidade de Taubaté (UNITAU), WagnerComenale@hotmail.com ou Wagner.Comenale@unitau.br.

²Engenheiro Eletricista e Professor Doutor em Engenharia de Fusão Termonuclear Controlada, Universidade de Taubaté (UNITAU), Instituto Federal de São Paulo (IFSP – Campinas) e Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC – Pindamonhangaba), LFWBarbosa@gmail.com, Filipe.Wiltgen@unitau.br ou Filipe.Wiltgen@ifsp.edu.br.

³Bacharel em Computação Científica e Professor Doutor em Engenharia Mecânica, Inteligência Artificial, Universidade de Taubaté (UNITAU), Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC – Cruzeiro), Luis.Almeida@unitau.br.

Palavras-chave: Controle. Lógica Nebulosa. Extrusoras. Fabricação de Pneus.

Abstract: This paper presents research related to development of an intelligent control system based on fuzzy logic technique for use in a rubber extruder in manufacture of automotive tires. The control system acts directly on output pressure of extruded material from a single screw extruder. The study was carried out in an industrial environment in a rubber extruder with ~200mm in diameter used in manufacture of automotive tires. The analysis of different variables in extrusion process allowed us to establish different membership rules and functions for control nebulous system. The nebulous control system guarantees constant flow of extruded material by controlling the screw speed extruder, thus ensuring stabilization of final weight extruded product. This stable behavior not only guarantees acceptable levels of extruded product weight, but also significantly reduces loss of raw material, as well as quality variations tire manufacturing process in automotive industry.

Keywords: Control. Fuzzy Logic. Extruders. Tire Manufacturing.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (ANIP), no território brasileiro estão instaladas ~20 plantas fabris de diferentes fabricantes de pneus, com um número estimado de pneus produzidos no ano de 2020 de ~68 milhões de unidades. Os pneus estão presentes em diversas aplicações, em diferentes tipos de veículos de carga e tração.

Por ser o único elo de contato entre o veículo e o solo, o pneu é um dos componentes mais importantes do veículo, seu desempenho influencia diretamente a segurança dos passageiros. Outro ponto importante a ser considerado, são os fatores ambientais, a redução no consumo de combustíveis diminui significativamente a emissão de gases poluentes além de aumentar a autonomia do veículo.

O pneu possui ainda importante relação com o conforto, dirigibilidade, frenagem, mudança de direção, estabilidade, aderência e diversos outros aspectos dos veículos (WERLANG e SILVEIRA, 2013).

As exigências do mercado consumidor e a concorrência entre os competidores nacionais e internacionais tem aumentado. Para entender as exigências do mercado consumidor e para enfrentar a concorrência crescente entre a indústria nacional e internacional na fabricação de pneus, é imprescindível iniciar uma etapa disruptiva dos processos atuais para uma imersão completa da indústria fabricante de pneus na quarta revolução industrial, a Manufatura Avançada (MA).

Atualmente muitos processos produtivos estão defasados tecnologicamente e por este motivo são realizados de forma manual tornando-os imprecisos, ineficientes, e pior, personalizados. Esse tipo de controle depende exclusivamente da habilidade de um determinado operador na execução do controle e dos ajustes necessários para a fabricação.

A ação de controle em uma máquina do tipo extrusora quase sempre é realizada por operadores humanos, identificando as interferências e perturbações, e assim, modificando os parâmetros operacionais da máquina.

Dentre as perturbações mais comuns, têm-se as mudanças climáticas, as mudanças no processo produtivo e também, da própria matéria-prima utilizada no processo (COMENALE e WILTGEN, 2021).

As diferentes percepções de cada operador evidenciam diferentes problemas e diferentes soluções as quais trazem peculiaridades inadmissíveis em um processo contínuo de produção com qualidade. A variação do método empregado na análise da situação problema e a latência nas ações de controle tornam as respostas do processo lenta e falha, e por estes motivos devem ser substituídas o quanto antes por sistemas de controle autônomos (SALES *et al.*, 2014; PREVIDI *et al.*, 2005).

Para substituir o modelo atual aplicado à fabricação manual, os processos produtivos devem ser aperfeiçoados através de novas técnicas e novos sistemas de controle automatizados, como esperado na utilização da 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 garantir uniformidade do processo produtivo (COMENALE e WILTGEN, 2021; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021).

Este estudo tem o objetivo de substituir o método atualmente utilizado no processo de extrusão de borracha para a fabricação de pneus. Migrar o sistema de controle totalmente manual que está em uso por um sistema de controle automático e inteligente, capaz de identificar e de se adaptar às perturbações das variáveis de processo.

Sensores instalados na extrusora, ao longo do processo e na medição dos parâmetros ambientais, permitirá mensurar dinamicamente todas as perturbações relacionadas ao processo produtivo para assim estabelecer ações de controle mais adequadas a estas perturbações a fim de se obter a otimização na resposta do sistema de controle (ABEYKOON, 2016).

Para isso foi implementado um controlador *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 do parafuso da extrusora para a estabilização da pressão de saída do processamento, este controle tem o objetivo de garantir um fluxo contínuo da borracha extrudada pela matriz modeladora e conseqüentemente obter um controle eficiente e de fácil interação.

O desenvolvimento do projeto está baseado na plataforma do controlador lógico programável *Controllogix 5.000* e o programa supervisório *Factory Talk View SE*. Com o controlador lógico são realizadas as aquisições dos dados e todos os cálculos matemáticos para a implementação do sistema de controle nebuloso. Apresentação dos valores das variáveis de entrada e saída do sistema de controle, assim como, a reprodução de uma interface gráfica com a resposta em tempo real do peso do material extrudado utilizando o programa supervisório.

2 EXTRUSORA DE PARAFUSO SIMPLES APLICADA AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PNEUS

O processo de extrusão é um dos principais métodos de processamento de materiais poliméricos e é responsável pela produção de muitos produtos. O equipamento denominado como extrusora de parafuso simples é considerado uma das partes mais importantes das indústrias de processamento de borracha. O processo de extrusão é considerado um processo produtivo complexo, pois as interferências de diferentes naturezas influenciam diretamente na qualidade do produto extrudado (ABEYKOON, 2014A).

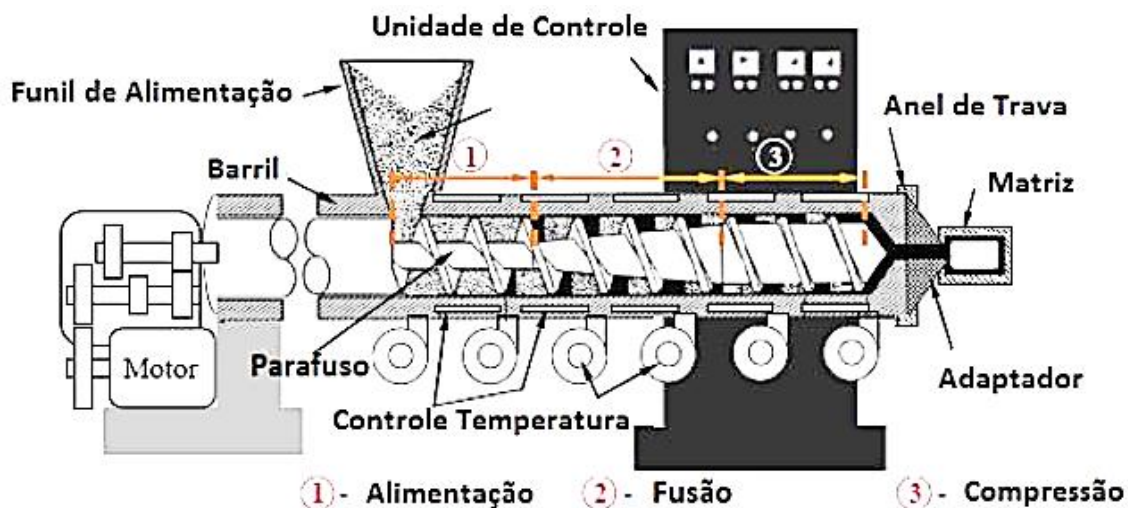
Caracterizado por ser um sistema versátil, de elevada produtividade e de baixo custo, o princípio fundamental de funcionamento do processo de extrusão é a conversão da matéria-prima, que inicialmente está no estado sólido em uma massa fluída, basicamente pela aplicação de calor e atrito mecânico. As partes que compõem uma extrusora podem ser observadas na Figura 1.

O objetivo de uma extrusora de borracha é transportar e comprimir a massa fluída de borracha derretida através de um parafuso sem fim, contra

uma matriz modeladora, sob determinada pressão (RAUWENDAAL, 2013; SANTOS *et al.*, 2010).

Quando o material extrudado passa pela matriz modeladora, assume um novo perfil, que será definido pelo formato geométrico da matriz modeladora (SALES *et al.*, 2014).

Figura 1 – Componentes básicos de uma extrusora de parafuso simples.



Fonte: Adaptado de MAHTO e MURMU (2015).

Dentre as partes de uma extrusora o principal componente para seu funcionamento é o parafuso helicoidal sem fim. Este componente é dividido basicamente em três zonas geometricamente distintas. A primeira zona conhecida como zona de alimentação possui uma maior profundidade do canal do parafuso proporcionando uma maior área de recepção do material no estado sólido, a segunda zona é chamada de zona de fusão responsável em fundir o polímero, e por fim, a terceira zona é chamada de zona de compressão, possui uma profundidade reduzida do canal do parafuso, causando assim a compressão do material no canal do parafuso.

A alimentação de matéria-prima na extrusora é realizada por uma esteira transportadora e por um funil de alimentação, este tem a função de direcionar toda a matéria-prima necessária para o interior do barril na zona de alimentação do parafuso sem fim. O parafuso sem fim está conectado

mecanicamente com o redutor mecânico e este com um motor elétrico, o motor elétrico por sua vez está interligado a uma unidade de controle que varia a velocidade de rotação do parafuso conforme as exigências do processo.

Uma vez que a matéria-prima entra em contato com o parafuso é conduzida pelo interior do barril através do movimento do parafuso. A geometria construtiva do 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).

Finalmente na extremidade de saída da extrusora o material fundido é pressionado contra uma matriz modeladora, resultando no material extrudado com o formato geométrico definido pela matriz.

Para tornar todo este processo funcional e eficiente as extrusoras devem estar equipadas com sistemas de controle e sensores que realizam o monitoramento de muitas grandezas físicas em tempo real, tais como: temperatura, velocidade, pressão e peso do material extrudado, além da viscosidade da borracha (RODRIGUEZ *et al.*, 2004; YAMASHITA, 2009; ABEYKOON *et al.*, 2011; ABEYKOON, 2014B; ABEYKOON, 2016; RAUWENDAAL, 2013; PREVIDI *et al.*, 2005; QUELHO, 2018; RESONNEK e SCHOPPNER, 2019).

O processo de extrusão de borracha com controle manual humano implica em frequentes intervenções de um operador junto à máquina. A qualidade do material extrudado está diretamente vinculada ao comportamento das perturbações que atuam no fluxo de fusão do material, apesar de ser o principal parâmetro a ser monitorado e controlado, poucas são as técnicas de controle disponíveis que priorizam o controle do fluxo de fusão do material extrudado. (RAUWENDAAL, 2013).

Na indústria produtora de pneus automotivos, é necessário eliminar ou minimizar a maioria das interferências que ocorrem no decorrer dos processos de fabricação. Por produzir diferentes partes do pneu, o processo de extrusão

de borracha é uma etapa que tem forte impacto qualitativo no produto. No processo de extrusão, as principais características do produto extrudado são suas dimensões, peso, largura e espessura.

Uma vez monitorados os parâmetros de controle é possível minimizar as variações não desejadas durante o processo de produção e sua influência no produto final. Importantes variáveis de processo como temperatura do barril da extrusora, velocidade do parafuso simples, pressão de saída do material extrudado e a relação entre a taxa de cisalhamento e a viscosidade da matéria prima, caracterizada pelo comportamento não newtoniano da borracha, são variáveis que uma vez controladas têm influência direta no fluxo do material até a matriz modeladora. O fluxo constante da borracha derretida garante uma vazão constante do material extrudado pela matriz modeladora (RAUWENDAAL, 2013; LEÃO, 2018; COMENALE e WILTGEN, 2021).

Devido ao número de variáveis envolvidas e a quantidade de informações referentes ao processo implica em uma grande dificuldade para o operador humano realizar o controle deste tipo de máquina de forma eficiente durante o processo de fabricação das partes de um pneu de borracha.

Ao analisar individualmente cada uma das variáveis no processo produtivo, pode-se evidenciar os diferentes níveis de interferência para a implementação da Manufatura Avançada (MA) na indústria de borracha. Para cada perturbação que ocorre no processo de extrusão, uma ação corretiva deve ser implementada, o que dificulta uma ação de controle rápida e assertiva.

A principal consequência das perturbações no controle da máquina é a elevada fabricação de material extrudado fora dos requisitos mínimos de qualidade. Esse material deve ser descartado, pois caso contrário impacta em pneus fabricados com elevados índices de desbalanceamento os quais são descartados.

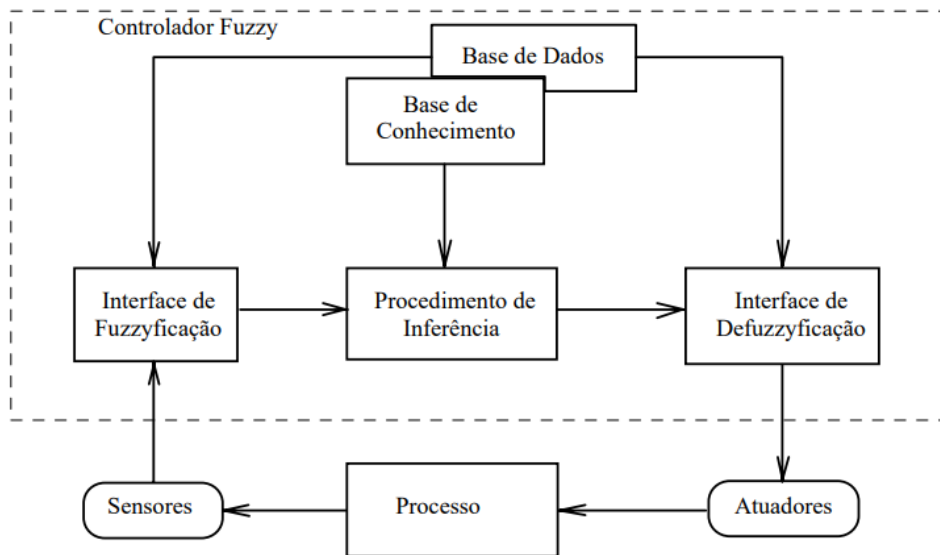
3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO

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, por este motivo o controle nebuloso possui diversas vantagens em relação aos sistemas de controle clássicos, a simplicidade e a flexibilidade de operação permitem uma transição gradual dentro de um intervalo contínuo (BILOBROVEC *et al.*, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2010; SAMPAIO *et al.*, 2007).

Diante de um processo produtivo complexo, operadores humanos não têm habilidade para implementar controle manual de forma eficaz e eficiente. Isso torna indispensável a aplicação 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).

A lógica nebulosa manuseia informações qualitativas de forma rigorosa. Esta técnica é considerada uma ferramenta conceitual baseada em regras capazes de tratar incertezas e imprecisões. Um controlador baseado em lógica nebulosa é composto pelas seguintes etapas: método de *fuzzyficação*, regras de seleção e decisão (bases de conhecimento e dados), funções de pertinência adequadas (Inferência), e método de *defuzzyficação*, conforme pode ser observado na Figura 2 (OLIVEIRA *et al.*, 2010; GOMIDE *et al.*, 1995; SIMÕES e SHAW, 2007).

Figura 2 – Blocos funcionais Controlador em Lógica Nebulosa.



Fonte: Adaptado de GOMIDE, GUDWIN e TANSCHUIT (1995).

O monitoramento das variáveis do processo produtivo é realizado através de sensores e transdutores e deverão sofrer um processo de conversão ou *fuzzyficação* para a definição das funções linguísticas de pertinência.

Na base de conhecimento um conjunto de regras serão definidas para estabelecer a relação de dependência entre as variáveis de entrada e saída, por fim converte-se os dados nebulosos através da *defuzzyficação* em um valor numérico aplicável ao controle. No processo em questão as funções de pertinência estão representadas no formato gráfico e obtidas através de suas respectivas funções (formato triangular) (BILOBROVEC *et al.*, 2004; JUNIOR *et al.*, 2020).

O método de *defuzzyficação* aplicado ao estudo é chamado de método de *defuzzyficação* pelas alturas ou Centro-do-Máximo (C-o-M). Esse método as áreas das funções de pertinência não interferem nas saídas, apenas os pontos máximos influenciam no resultado final (SIMÕES e SHAW, 2007).

Para realizar a aquisição dos dados e o processamento dos cálculos matemáticos na implementação da Lógica Nebulosa, foi utilizado o controlador lógico programável. O controlador modelo 1756L61 possui um sistema operacional multitarefa com capacidade de armazenamento 2Mbytes de

memória RAM e suporta endereçar uma grande quantidade de pontos de entradas e saídas (~128.000 digitais e ~4.000 analógicas).

Para o desenvolvimento da aplicação dois programas foram utilizados, *RSTLogix5000* para a programação do controlador lógico programável e o *Factory Talk View* utilizado para a interface gráfica homem máquina configurada para a visualização dos parâmetros de controle da extrusora.

O transdutor utilizado para medição da pressão de saída do material extrudado é o *DYNA-4-3.5C-15/46*, o qual possui faixa de medição de 0 a 350 bar, sinal de saída possui sensibilidade de ~30mV/Bar.

O sensor utilizado para a medição da temperatura ambiente foi o *RH T-WM TRANSMITTER*, com faixa de operação de -10°C à +65°C e sinal de saída analógico de 4-20mA.

A extrusora utilizada possui 200mm de diâmetro tem uma vazão de ~30kg/min de produto extrudado e uma temperatura de processamento de ~125°C, a velocidade de rotação do parafuso da extrusora será de no máximo 20 RPM, obtida através de um motor trifásico de corrente alternada com potência de 400 HP e 1.150 RPM.

O sistema de controle nebuloso a ser desenvolvido e implementado nesta pesquisa utiliza de diferentes abordagens para a determinação dos parâmetros de controle, tem o objetivo de monitorar constantemente o funcionamento da extrusora de borracha, como também, a experiência dos operadores humanos.

4 TESTES E PARÂMETROS DO SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO

As diferentes fontes de perturbações no processo de fabricação de um pneu causam diversos impactos ao resultado final do material extrudado, deste modo desenvolver uma solução que atenda aos requisitos de fabricação são de importância fundamental para a eficiência das extrusoras.

Grande parte dos sistemas de controle aplicados nos processos industriais são baseados em controladores *PID* (Controlador Proporcional

Integral e Derivativo). Este controlador tem como principal característica funcionar em sistemas com comportamento linear. Estes controladores não funcionam bem com sistemas não-lineares, ou com modelos matemáticos desconhecidos ou de alta complexidade (SIMÕES e SHAW, 2007).

Para este estudo não será utilizado o controle *PID*, exatamente por se tratar de um sistema não-linear, a extrusora de borracha necessita de constantes intervenções, além do comportamento não newtoniano da borracha processada no interior da extrusora.

A proposta da pesquisa é desenvolver e aplicar na prática um sistema de controle automatizado baseado em lógica nebulosa, que há muitos anos marcam o desenvolvimento tecnológico aplicados à indústria de manufatura.

Especificamente o sistema de controle nebuloso aplicado em uma extrusora na fabricação de pneus automotivos, o desenvolvimento do sistema tem como principal objetivo elevar a eficiência qualitativa e produtiva do equipamento, através da redução do descarte de material extrudado, garantindo a uniformidade da qualidade do material extrudado e consequentemente aumentando o volume de produção.

Para o desenvolvimento do sistema de controle nebuloso, foram mapeadas variáveis de controle da extrusora apresentadas no Quadro 1.

Na Quadro 1, podem ser observadas as variáveis de processo a serem empregadas no desenvolvimento do sistema de controle nebuloso para a construção de regras nebulosas para o controle e o ajustar as curvas das funções de pertinência, observando os resultados obtidos durante o processo de fabricação dos materiais extrudados.

Quadro 1 – Variáveis de controle para extrusora de borracha na fabricação de pneus.

Variáveis de Controle da Extrusora	
Velocidade	Velocidade Motor Parafuso da Extrusora
Pressão	Pressão de Saída do Material
Peso	Peso de Saída do Material
Viscosidade	Viscosidade da Matéria Prima
Temperatura	Temperatura Ambiente

Fonte: Próprios Autores (2021).

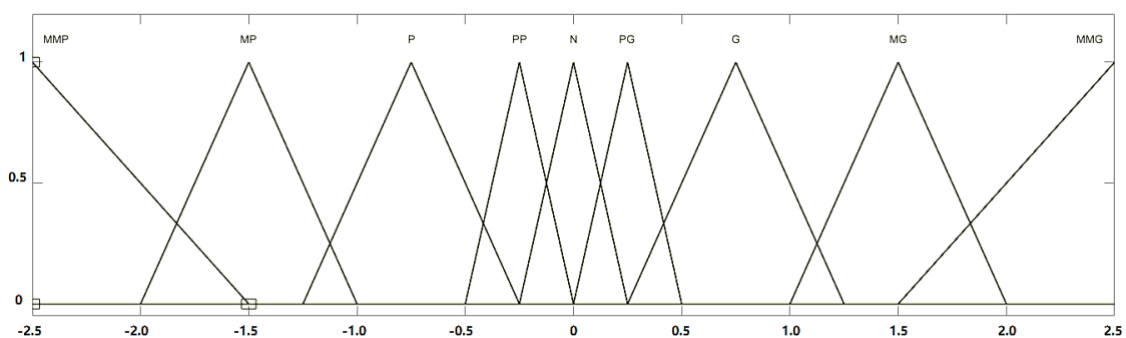
A primeira etapa para a determinar o sistema de inferência nebuloso é o processo de *fuzzyficação*, ou seja, elaborar diferentes funções de pertinência para as entradas e saídas do processo.

Para realizar o controle de pressão de saída do material extrudado foram utilizadas três entradas, uma sendo a própria **pressão** de saída do material extrudado, a **temperatura ambiente** e a **viscosidade** do composto utilizado, nas Figuras 3, 4 e 5 é possível observar as funções de pertinência para cada uma das variáveis pressão, temperatura e viscosidade.

A faixa de controle da pressão varia entre -2,5 à +2,5 Bar. Deve-se considerar que esta faixa de controle para função do ajuste (*setpoint*).

A função de pertinência é do tipo triangular é definida como: **MUITO-MUITO-PEQUENA (MMP)**, **MUITO-PEQUENA (MP)**, **PEQUENA (P)**, **POUCO-PEQUENA (PP)**, **NORMAL (N)**, **POUCO-GRANDE (PG)**, **GRANDE (G)**, **MUITO-GRANDE (MG)** e **MUITO-MUITO-GRANDE (MMG)**.

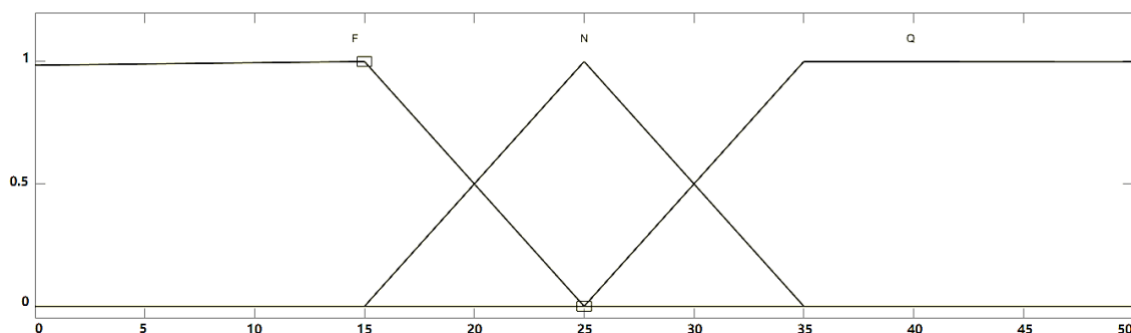
Figura 3 – Função de pertinência para pressão da extrusora de borracha na fabricação de pneus.



Fonte: Próprios Autores (2021).

Para o controle da temperatura foi determinada uma faixa de controle de ~0°C à ~50°C, pois os valores de temperatura ambiente monitorados durante a realização dos estudos estão dentro desta faixa. A função de pertinência é do tipo triangular e definida como: **FRIO (F)**, **NORMAL (N)** e **QUENTE (Q)**. Como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Função de pertinência para temperatura ambiente no local da extrusora de borracha para a fabricação de pneus.



Fonte: Próprios Autores (2021).

Para os compostos de borracha utilizados no processo de extrusão, são realizadas medições da sua respectiva viscosidade. Para determinar a viscosidade de um elastômero puro ou de uma composição não vulcanizada, é avaliada a sua resistência ao cisalhamento para isso é utilizado o viscosímetro Mooney (GUERRA *et al.*, 2004).

Um viscosímetro do tipo *Mooney* funciona a uma velocidade de ~2 RPM. É utilizado para determinar a viscosidade da matéria-prima. A resistência à rotação do viscosímetro irá indicar a viscosidade do tipo *Mooney*. Neste método são verificadas as condições ML (1+4) à ~100°C (M viscosidade, L tipo de rotor, 1 tempo de pré-aquecimento (minutos), e 4 tempos de funcionamento dos rolos (minutos)) (GUERRA *et al.*, 2004).

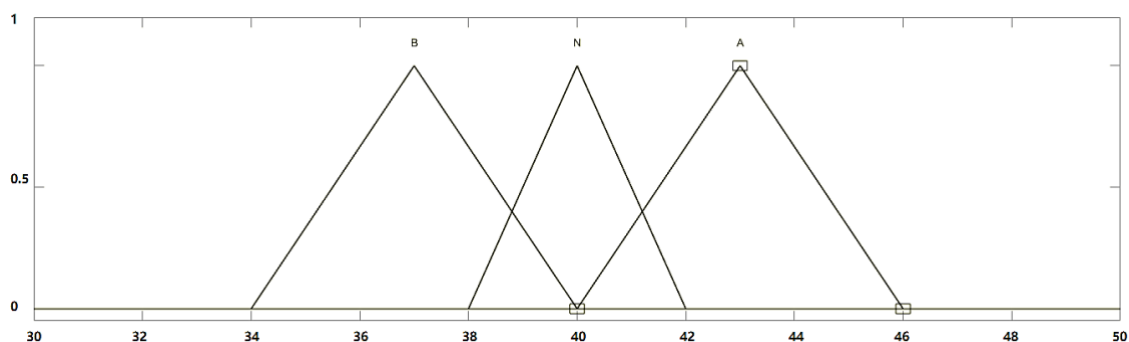
O viscosímetro após atingir o valor máximo de viscosidade, inicia o processo de diminuição gradativa, influenciada pela característica da borracha e pela homogeneização da temperatura. Após os testes, registra-se o valor instantâneo da viscosidade no momento, chamada de viscosidade de *Mooney*.

Como resultado são obtidos os índices de viscosidade dos corpos de prova da matéria-prima, cada corpo de prova representa um lote de composto que será utilizado no processo de fabricação das partes do pneu.

O valor de cada corpo de prova registrado pelo viscosímetro, é agrupado em intervalos de 34 a 46 unidades, estes valores servem como referência para delimitar a função de pertinência e sua interferência no controle do fluxo do

material extrudado. Na Figura 5 observa-se a função de pertinência do tipo triangular e definidas como: **BAIXA (B)**, **NORMAL (N)** e **ALTA (A)**.

Figura 5 – Função de pertinência para a viscosidade na extrusora de borracha para fabricação de pneus.



Fonte: Próprios Autores (2021).

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

O equipamento utilizado para os testes de campo foi uma extrusora de parafuso simples, com ~200 mm de diâmetro e uma vazão de ~30 kg/min de borracha extrudada. Na Figura 6 é possível observar uma fotografia da extrusora de borracha na fabricação de partes de pneu operando com os testes do sistema de controle em lógica nebulosa.

Os testes foram realizados com diferentes lotes de materiais, a fim de verificar o comportamento do sistema de controle nebuloso, operando com diferentes borrachas, e também, sob diferentes condições ambientais e variações dimensionais do produto extrudado.

Como premissa do desenvolvimento do projeto o desvio máximo aceitável para resposta do sistema de controle nebuloso é de amplitude máxima de ~3% (pico a pico) do valor do peso final do produto extrudado. Para tanto as medições foram realizadas como uso de uma balança dinâmica de linha, capaz de realizar a medição em fluxo constante do material extrudado no transportador, o que permitiu a melhora do desempenho do controlador pela análise do material de forma mais precisa.

Figura 6 – Extrusora de fabricação de pneus com o sistema de controle em lógica nebulosa.



Fonte: Próprios Autores (2021).

Outro fator importante de melhoria no desempenho foi a velocidade de processamento do sistema de controle nebuloso implementado no controlador do controlador lógico programável (tempo de execução entre ~30 à ~134 m/s), valores totalmente compatíveis com o processo estudado.

Os testes realizados foram executados em duas etapas. Na etapa inicial foi desenvolvido um sistema de controle nebuloso com grau de interferência de cada uma das variáveis com o mesmo grau de relevância para realizar a correção no sistema de controle. Entretanto, nessa configuração observou-se instabilidade na resposta do sistema, devido ao controle ineficaz da velocidade do parafuso na extrusora o que impedia o fluxo constante do material extrudado na saída da fieira modeladora provocando variações no peso final do produto.

Na Figura 7 é possível verificar o sinal referente ao comportamento do peso instantâneo do material extrudado sobre a balança dinâmica de linha. É possível notar, a instabilidade no peso do material devido às oscilações do peso (acima da tolerância máxima admissível de ~6%). Estas variações de peso ocorrem principalmente pela dificuldade do operador em monitorar todas as variáveis relacionadas ao processo produtivo, e assim, conseqüentemente de elaborar uma boa estratégia de controle nas correções das interferências.

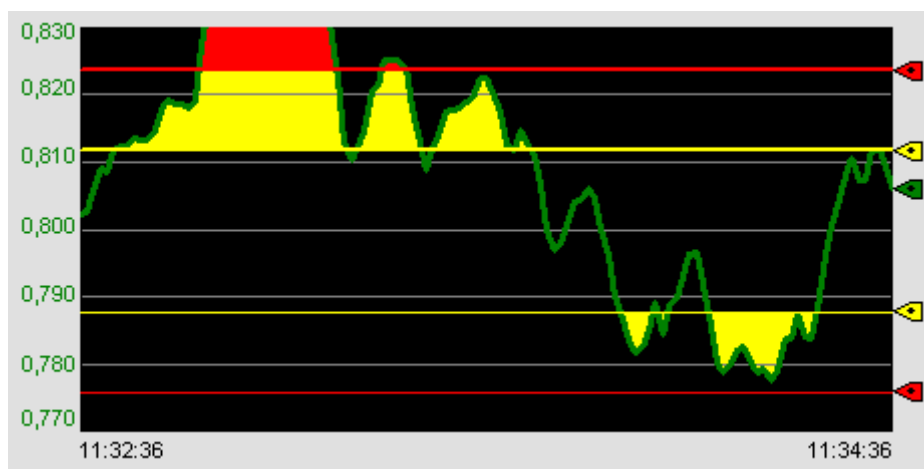
Posteriormente foram configurados novos e diferentes níveis de relevância para as variáveis de controle. Com isso foi observada uma maior

estabilidade no fluxo de saída do material extrudado e desta forma, melhora nos resultados com relação ao peso final do produto e no desempenho do controlador nebuloso.

Neste caso o peso foi ajustado para ~0,8 kg. Na Figura 7 a linha na cor verde indica o peso instantâneo do material que percorre a plataforma da balança a dinâmica (entrada). As linhas na cor amarela delimitam os limites do peso do material extrudado (saída).

Entre as linhas amarela e vermelha, tanto na parte superior quanto na parte inferior, as são áreas consideradas para o processo de fabricação. Acima da linha vermelha superior e abaixo da linha vermelha inferior, estão sinalizados os produtos extrudados que estão com o peso fora das especificações de fabricação, ou seja, devem ser descartados não poderão ser utilizados na construção do pneu.

Figura 7 – Resposta do sistema de controle nebuloso aplicado na extrusora de borracha na fabricação de pneus.



Fonte: Próprios Autores (2021).

Nas Figuras 8 e 9 o comportamento das variações obtidas na balança dinâmica referente ao peso final do produto extrudado, apresentam variações inferiores a ~3% em relação ao valor do peso ajustado.

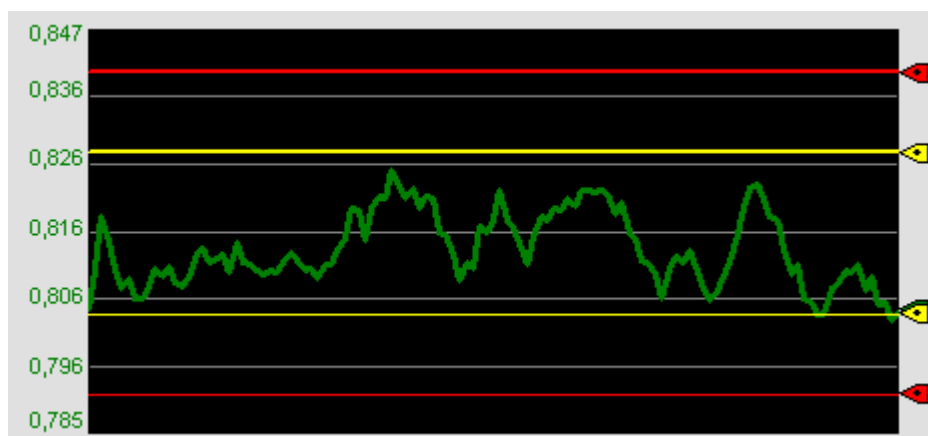
O sistema de controle foi submetido a diferentes situações no qual diferentes compostos de borracha com diferentes características dimensionais

e diferentes valores de ajustes de peso foram escolhidos. Tudo implica diretamente na alteração do comportamento do fluxo de saída do material extrudado. Mesmo com todas estas mudanças nas características do produto extrudado pode-se observar nas Figuras 8 e 9 um comportamento mais estável do sistema de controle nebuloso (entre as linhas amarelas).

Para atenuar a amplitude das variações do peso e aproximar os valores dos pesos medidos instantaneamente, em relação ao valor do peso de ajuste, o sistema de controle nebuloso utiliza como parâmetros de entrada, os valores de pressão de saída do material extrudado, a temperatura ambiente e a viscosidade do material. Como saída atua no controle da velocidade do parafuso da extrusora controlando o fluxo contínuo do material extrudado.

Na Figura 8, pode-se observar o resultado do primeiro teste, com ajuste de peso de ~0,816 kg, com pressão de ~62 Bar, com temperatura ambiente de ~28°C e viscosidade de 42,1 UM. As variações apresentadas na figura são inferiores a ~3% (pico a pico) em relação ao valor do peso ajustado, ou seja, entre as linhas amarelas superior e inferior.

Figura 8 – Resposta do sistema de controle nebuloso aplicado na extrusora de borracha na fabricação de pneus.

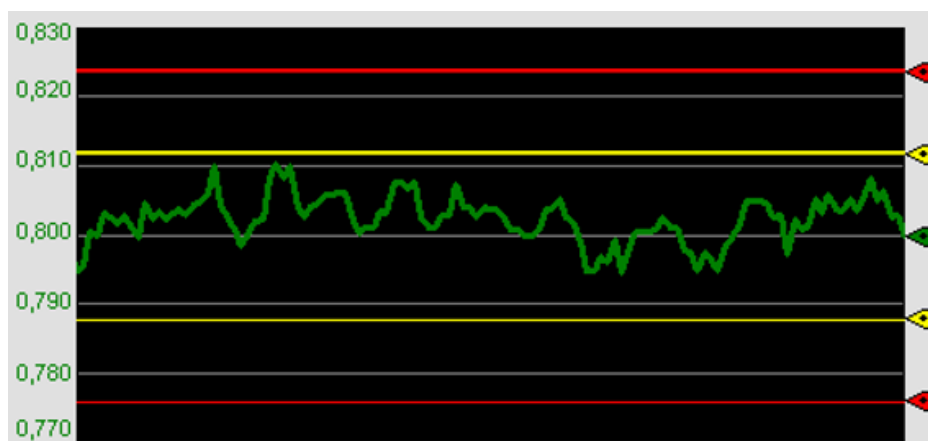


Fonte: Próprios Autores (2021).

Na Figura 9, pode-se observar o resultado do segundo teste do sistema de controle nebuloso operando com peso de ~0,8 kg, pressão de ~60 Bar,

temperatura ambiente de $\sim 25^{\circ}\text{C}$ e viscosidade de 43,7 MU. Nessa condição, as variações foram inferiores a $\sim 3\%$ em relação ao valor do peso ajustado.

Figura 9 –Resposta do sistema de controle nebuloso aplicado na extrusora de borracha na fabricação de pneus.



Fonte: Próprios Autores (2021).

5 PERSPECTIVAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de controle nebuloso proposto durante os testes iniciais apresentou limitações de desempenho, sanadas rapidamente com os ajustes em cada uma das variáveis utilizadas. Comportando-se de modo mais estável garantindo não só uma resposta dentro dos níveis aceitáveis de peso do produto extrudado, mas também, reduzindo em $\sim 50\%$ a amplitude das variações admissíveis.

O controle do fluxo de saída do material extrudado ocorreu de forma estável, permitindo desenvolver e implementar melhorias significativas no processo produtivo industrial de máquinas de manufatura.

Em pesquisas futuras, outras variáveis que não foram exploradas podem melhorar significativamente o processo de extrusão.

Assim sendo, conclui-se que houve êxito nos primeiros resultados do sistema de controle nebuloso proposto para a pesquisa. Além disso, todas as etapas para o desenvolvimento deste sistema de controle nebuloso são de fácil

compreensão e não dependem de conhecimentos matemáticos avançados, o que possibilita a continuidade das melhorias no sistema implantado em campo.

A utilização deste modelo de sistema de controle nebuloso agrega tecnologia nos processos produtivos, mas também, possibilita o aperfeiçoamento nos processos e nos recursos utilizados. Garantindo a redução nas variações de peso do material extrudado, melhoria na qualidade do produto, aumento de disponibilidade, incremento no volume de produção, redução no consumo de matéria-prima, água, energia elétrica e de material e produto descartado.

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

REFERÊNCIAS

Abeykoon, C., Li, K., McAfee, M., Martin, P. J. and Irwin, G. W. (2011). Extruder Melt Temperature Control with Fuzzy Logic. 18th IFAC World Congress. Milano, 28 August - 10 September, p.8577-8582.

Abeykoon, C. A. (2014A). Novel Model-Based Controller for Polymer Extrusion. IEEE Computational Intelligence Society. v.22(06), p.1413-1430.

Abeykoon, C. A. (2014B). Novel Soft Sensor for Real-Time Monitoring of the Die Melt Temperature Profile in Polymer Extrusion. IEEE Computational Intelligence Society. v.61(12), p.7113-7123.

Abeykoon, C. (2016). Single Screw Extrusion Control: A Comprehensive Review and Directions for Improvements, University of Manchester. v.1, p.1-13.

Bilobrovec, M., Marçal, R. F. M. e Kovaleski, J. L. (2004). Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy. XV Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Bauru, 8-10 de novembro, p.1-7.

Comenale, W. e Wiltgen, F. (2021). Automação Industrial para a Manufatura Avançada com Apoio da Engenharia de Sistemas & Requisitos. 11 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba, 24-26 maio, p.1-8.

Gomide, F. A. C., Gudwin, R. R. e Tanscheit, R. (1995). Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações. Proc. 6th IFSA Congress – Tutorials, São Paulo, 21-28 julho, p. 1-38.

Guerra, B. B., Furtado, C. R. G. e Coutinho, F. M. B. (2004). Avaliação Reológica de Elastômeros e suas Composições. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. v.14(4), p.289-294.

Junior, M. A. B., Soares, V. A., Gonçalves, G. J. C., Munhoz, M. R., Dias, L. G., Barbara, G. V. e Breganon, R. (2020). Implementação de um Controlador Fuzzy para Controle de Temperatura. *Brazilian Journal of Development*. v.6(06), p.38231-38245.

Leão, R. F. B. (2018). Otimização de Parâmetros Críticos no Acoplamento do Conjunto com a Carcaça na Construção de um Pneu. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 101p.

Mahto, P. K. and Murmu, R. (2015). Temperature Control for Plastic Extrusion Process. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. p.5748-5658.

Oliveira, D. N., Braga, A. P. S. e Almeida, O. M. (2010). Fuzzy Implementado em Ladder com Funções de Pertinência Descontínuas. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito, 12-16 setembro, p.411-416.

Previdi, F., Savaresi, S. and Panarotto, A. (2005). Design of a Feedback Control System for Real-Time Control of Flow in a Single-Screw Extruder. 16th Triennial Congress, Prague, 3-8 July, p.454-459.

Quelho, P. E. Q. (2018). Desenvolvimento de Extrusora Experimental e Software para Controle e Supervisão das Variáveis de Extrusão do ABS. Dissertação de Mestrado. Centro Universitário de Volta Redonda. 150p.

Rauwendaal, C. (2013). *Polymer Extrusion*. Germany, Munich. p. 934.

Resonnek, V. and Schoppner, V. (2019). Self-optimizing barrel temperature setting control of single screw extruders for improving the melt quality. AIP Conference Proceedings, Taipei, 6 February, p.030010-1-030010-5.

Rodriguez, M. R., Perdomo, J., Strefezza, M. e Colmenares, W. (2004). Control de uma Extrusora de Plástico usando um Control PI Difuso Adaptado com Error de Predicción Ddel Modelo. *Revista Ciencia e Ingenieria*, v.25(01), p.61-66.

Sales, J. C., Santos, M. W. L. C., Brandão, F. S., Braga, W. A., Morais, J. E. V., Sales, A. J. M. e Sombra, A. S. B. A (2014). Extrusão na Indústria de Cerâmica Vermelha no Ceará. 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Bento Gonçalves, 18 a 21 maio. p.1083-1093.

Sampaio, L. M. D., Oliveira, M. J. F. e Ignacio, A. A. V. (2007). Lógica Nebulosa: Aplicações e Tendências. Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, Rio de Janeiro, 7-8 de novembro, p.1-15.

Santos, D. M., Bukzem, A. L., Coutinho, N. D., Ascheri, J. L. R. e Ascheri, D. P. R. (2010). Principais Considerações da Extrusão Termoplástica de Alimentos. Revista Processos Químico, v.1, p.38-44.

Sellitto, M. A. (2002). Inteligência Artificial: Uma Aplicação em uma Indústria de Processo Contínuo. Gestão & Produção. v.9(03), p.363-376.

Simões, M. G. e Shaw, I. A. (2007). Controle e Modelagem Fuzzy. São Paulo. 186p.

Werlang, R. B. e Silveira, F. L. (2013). A Física dos Pneumáticos. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v.30(03), p.614-627.

Wiltgen, F. (2020). A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada. Revista Tecnologia, v.41(02), p.1-11.

Wiltgen, F. (2021). Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas. 26° International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba, 18-22 setembro, p.1-10.

Yamashita, D. M. Compostos de Borracha. (2009). ITAL, Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens, v.21(01), p.1-9.

Enviado em: 31 mar. 2022.

Aceito em: 14 jun. 2022.

Editora responsável: Ágatha Borges Teixeira.