

CONTROLADOR NEBULOSO PARA EXTRUSORAS DE BORRACHA

Wagner Comenale, WagnerComenale@hotmail.com¹

Filipe Wiltgen, LFWBarbosa@gmail.com²

¹Universidade de Taubaté, Wagner.Comenale@unitau.br

²Universidade de Taubaté, Filipe.Wiltgen@unitau.br

Resumo. Este artigo tem o objetivo de apresentar uma pesquisa referente ao desenvolvimento de um sistema de controle nebuloso aplicado a extrusoras de parafuso simples para a fabricação de pneus automotivos. Por se tratar de um processo considerado não linear e sujeito a diferentes perturbações externas, a pesquisa visa substituir a dependência do conhecimento humano por um sistema baseado no conhecimento intrínseco traduzido na forma de expressões matemáticas em regras de funcionamento baseados em históricos de sucesso e de fracasso na fabricação de pneus. Apesar de muitos avanços tecnológicos a maioria de aplicações que utilizam extrusoras de borracha ainda possuem sistemas de controle manuais e dependente da experiência do operador humano. O sistema de controle a ser aplicado nessa pesquisa é baseado na técnica de inteligência artificial conhecida como lógica nebulosa que permite modelar matematicamente problemas complexos e não lineares através de regras simples que permitem o desenvolvimento de um controlador nebuloso implementado em CLP (Controlador Lógico Programável) industrial. Esta pesquisa foi desenvolvida e testada em ambiente fabril industrial em uma extrusora com ~200mm de diâmetro destinada a fabricação de pneus automotivos. O sistema utiliza como referência a pressão de saída do material extrudado para atuar no controle da velocidade do parafuso da extrusora de tal forma a garantir que o fluxo de material extrudado seja constante, e assim, consequentemente mantendo o peso final do produto extrudado constante permitindo a uniformidade na fabricação. A análise de diferentes variáveis envolvidas no processo de extrusão permitiu estabelecer diferentes regras e funções de pertinência para o controle do sistema nebuloso. O comportamento estável do sistema proporciona redução de desperdícios de matéria-prima, energia elétrica e eleva os níveis de produção. Pode-se observar que a resposta do sistema de controle nebuloso desenvolvido na pesquisa conseguiu reduzir em até ~50% as variações do peso do material extrudado obtendo apenas ~3% de variação em relação ao valor do peso ajustado comprovando a maior uniformidade na fabricação das partes de um pneu automotivo.

Palavras-chave: Lógica Nebulosa, Sistemas de Controle, Extrusoras, Manufatura Avançada, Inteligência Artificial.

1. INTRODUÇÃO

O consumo global descontrolado dos recursos naturais causa o esgotamento da natureza e um fardo para as próximas gerações causando inevitáveis impactos na qualidade de vida da civilização humana. É patente a necessidade do desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis que podem fazer uso mais racional e responsável dos recursos naturais disponíveis.

O principal produto advindo da borracha são os pneus. Anualmente no Brasil são produzidos ~50 milhões de unidades de pneus. A diversificação dos pneus atende a muitos tipos diferentes de aplicações, seja em veículos automotores (pequeno, médio e grande porte), bicicletas, diversos sistemas de transporte, e até mesmo em brinquedos.

O pneu é um dos componentes mais importantes do veículo, pois seu desempenho tem impacto direto na segurança dos passageiros. O pneu é o único componente do veículo que conecta o mesmo ao solo. Através dele transfere-se o torque do motor para o solo permitindo o deslocamento do veículo, além da dirigibilidade, frenagem, mudança de direção, estabilidade, aderência, economia e conforto (Werlang e Silveira, 2013).

Por ser um item que agrega segurança aos veículos e pelos impactos ambientais gerados, cada vez mais as indústrias fabricantes de pneus manifestam interesse em melhorar a eficiência de seus processos e produtos.

Infelizmente muitos processos relativos à fabricação de pneus está sob o controle e supervisão de ações humanas e realizados manualmente implicando em baixa eficiência. Controles e processos realizados de forma manual, tem como características respostas lentas e personalizadas, pois dependem exclusivamente das habilidades de cada operador humano na execução dos ajustes necessários nos parâmetros operacionais para os diferentes tipos de perturbações, desde pequenas variações na mudança climática, de processo, assim como, das características da matéria-prima utilizada (Comenale e Wiltgen, 2021).

Os operadores humanos divergem sobre o procedimento adotado para cada nova correção das perturbações existentes no sistema, a falta de padronização no processo, mesmo que manual, evidenciam peculiaridades inadmissíveis em um processo contínuo de produção com qualidade. A falta de padronização no método empregado na análise da situação problema e a latência nas ações de controle tornam as respostas do processo sempre lenta e falha, e por estes motivos devem ser substituídas o quanto antes por sistemas de controle autônomos e automáticos (Previdi *et al.*, 2005; Sales *et al.*, 2014).

Para substituir o modelo atual deve se aperfeiçoar os processos utilizando técnicas de Manufatura Avançada, uma das principais é a substituição da ação humana em tarefas repetitivas e contínuas, evitando a interferência humana nesses processos garantindo uma maior repetibilidade e assertividade nos resultados. O compartilhamento das informações digitais relativas aos diversos processos permite a integração industrial. Isso permite aplicar sistemas de controle autônomos e inteligentes nas máquinas (Comenale e Wiltgen, 2021; Wiltgen, 2020; Wiltgen, 2021).

Como pode ser visto na Fig. 1, o processo de fabricação de pneus inicia com a mistura de diferentes matérias-primas para a formação de mantas de borracha que serão utilizadas nos processos subsequentes. Na continuidade do processo de extrusão, a manta de borracha é submetida a homogeneização e plastificação no interior da extrusora, o resultado na saída da extrusora é o modelamento de diferentes tipos de produtos que seguem os formatos estabelecidos pelas fieiras modeladoras. Depois no processo de calandra no qual os fios de nylon, poliéster ou mesmo os de aço são inseridos e também recobertos por camadas de borracha. Na agregação os produtos extrudados e calandrados vão para a montagem do pneu, formando a carcaça de um pneu. Por fim, no processo de vulcanização o pneu é finalizado (Leão, 2018).

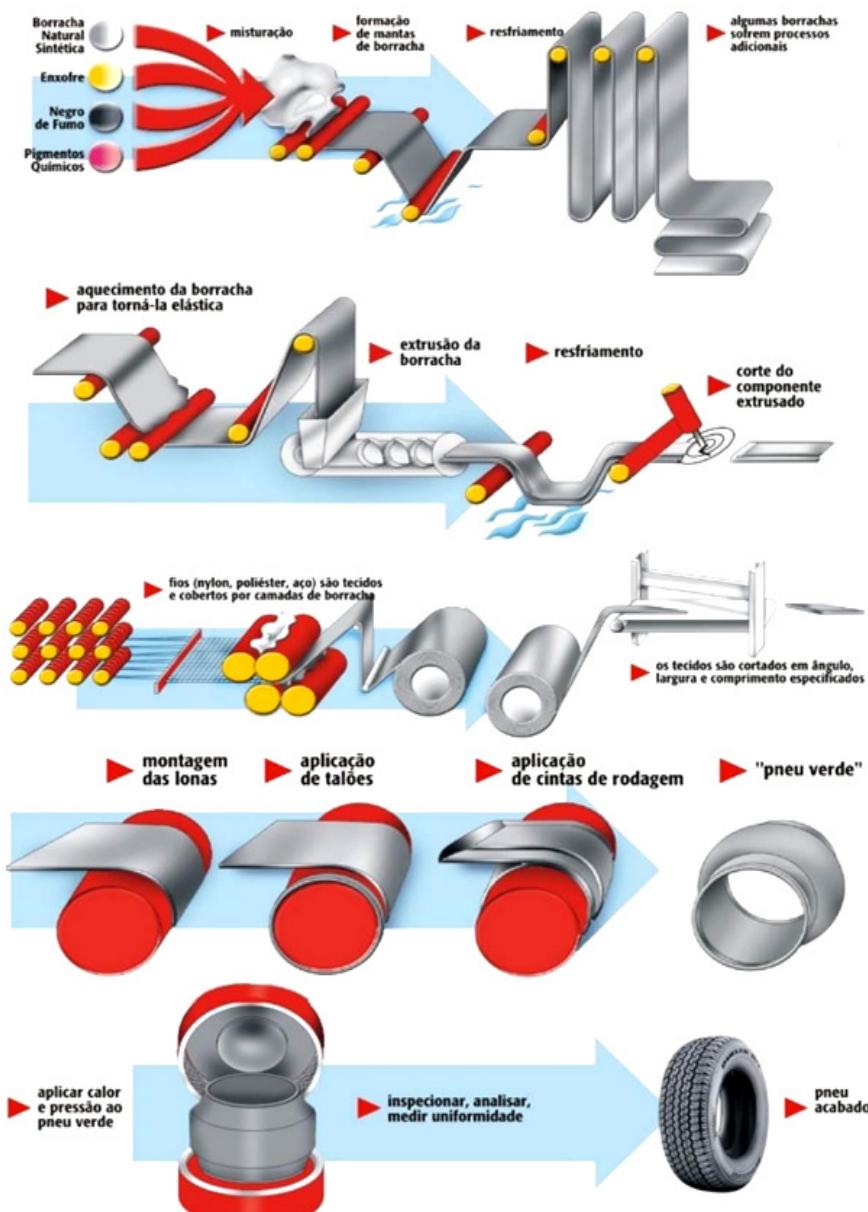


Figura 1. Processo de fabricação de um pneu automotivo. (Adaptado de Carvalho 2007)

Este estudo tem o objetivo de substituir o método de controle 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 reproduzir as melhores estratégias de controle através de regras heurísticas, com a finalidade de corrigir as perturbações das variáveis de processo. Sensores instalados na extrusora, ao longo do processo e na medição dos parâmetros ambientais, permitirão 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; Simões, 2007).

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 tem o objetivo de garantir um fluxo contínuo da borracha extrudada pela matriz modeladora e garantir indiretamente que não ocorra variação no peso do produto extrudado que ultrapasse +/- 6% do peso total do produto extrudado afim de se obter um controle eficiente e de fácil interação.

O desenvolvimento do projeto está baseado na plataforma do controlador lógico programável *Controllogix 5000* em conjunto com o programa supervisório *Factory Talk View SE*. Toda a aquisição de dados e todos os cálculos matemáticos para a implementação do sistema de controle *nebuloso* estão sendo realizados através do controlador lógico. 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 utiliza o programa supervisório.

2. EXTRUSORAS DE BORRACHA DO TIPO PARAFUSO SIMPLES

Responsável por ser uma das principais etapas na fabricação de objetos de borracha e pela produção de inúmeros tipos de produtos, a extrusora de parafuso simples é considerada uma das máquinas mais importantes nas indústrias de processamento de borracha. O processo de extrusão é caracterizado por ser um processo produtivo complexo, pois as interferências de diferentes naturezas influenciam diretamente na qualidade do produto extrudado (Abeykoon, 2014A; Abeykoon, 2016).

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, inicialmente no estado sólido em uma massa fundida pela aplicação de calor e do atrito mecânico. As partes que compõem uma extrusora podem ser observadas na Fig. 2.

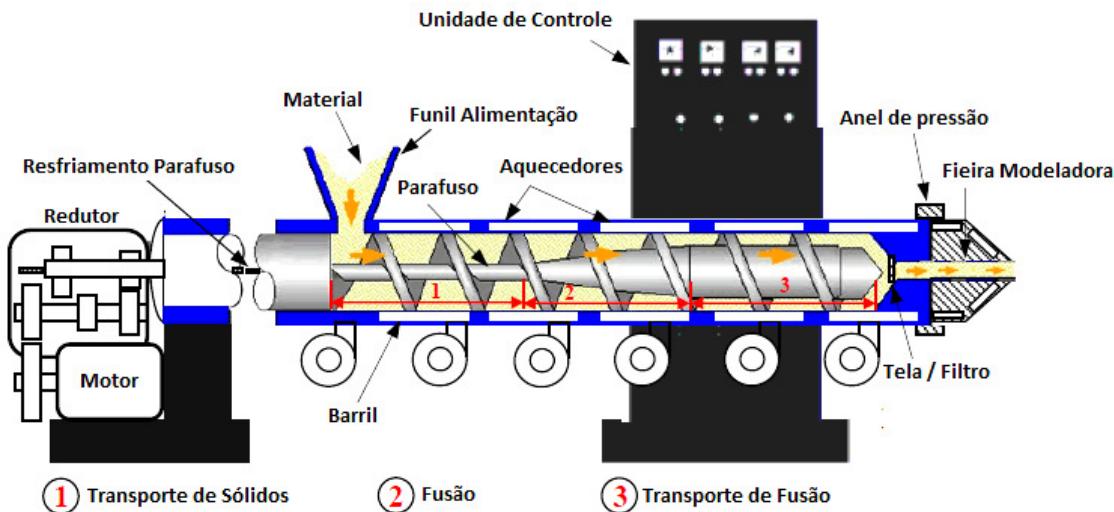


Figura 2. Componentes básicos de uma extrusora de parafuso simples. (Adaptado de Mahto e Murmu, 2015)

A extrusora de borracha tem como objetivo o processamento, transporte e compressão da massa fluída de borracha fundida através de um parafuso sem fim, contra uma fieira modeladora, sob determinada pressão a ser controlada (Abeykoon, 2016; Rauwendaal, 2013; Santos *et al.*, 2010).

O material extrudado fundido ao passar pela fieira modeladora, assume um novo perfil, que será definido pelo formato geométrico da fieira modeladora (Sales *et al.*, 2014).

Na Fig. 2 pode ser observado o conjunto de componentes de uma extrusora, o componente fundamental para seu funcionamento é o parafuso helicoidal sem fim. Este componente é 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 fieira modeladora.

A matéria-prima é alimentada na extrusora através de um transportador e por um tipo de 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 helicoidal. O transporte, processamento e compressão da matéria-prima ocorre pelo movimento rotacional do parafuso helicoidal que está conectado mecanicamente há um sistema redutor com 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 de cada processo.

A matéria-prima entra em contato com o parafuso e transportada ao longo de todo o interior do barril. 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 eficiente as extrusoras devem estar equipadas com sistemas de controle e sensores que realizam o monitoramento de diversos tipos de grandezas físicas em tempo real, tais como: temperatura, velocidade, pressão e peso do material extrudado, além do monitoramento remoto em laboratório da viscosidade da borracha (Abeykoon *et al.*, 2011; Abeykoon, 2014B; Abeykoon, 2016; Preidi *et al.*, 2005; Quelho, 2018; Rauwendaal, 2013; Rodriguez *et al.*, 2004; Resonnek e Schoppner, 2019; Yamashita, 2009).

Apesar de melhorias significativas aplicadas as extrusoras, o controle manual do processo de extrusão de borracha impõe constantes desafios aos operadores das extrusoras que frequentemente realizam intervenções 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).

Para a produção de pneus automotivos devem ser respeitados os requisitos mínimos de qualidade do produto extrudado, para isso é necessário eliminar ou minimizar as interferências que ocorrem no decorrer dos processos de fabricação. Responsável pela produção de diferentes partes do pneu, o processo de extrusão de borracha é uma etapa que tem forte impacto qualitativo no produto, em que as características dimensionais, peso, largura e espessura do material extrudado deve ser rigorosamente controlado. A falha no monitoramento e no controle da extrusora pode levar ao descarte do produto.

Alcançar um fluxo constante e consistente na vazão do material extrudado pela fieira modeladora é a principal forma de obter produtos de qualidade. Portanto as variáveis de processo como temperatura do barril da extrusora, velocidade do parafuso, 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. O fluxo constante da borracha derretida garante uma vazão constante do material extrudado pela matriz modeladora que garante um produto dentro dos padrões de requisitos (Abeykoon, 2016; Comenale e Wiltgen, 2021; Leão, 2018; Rauwendaal, 2013).

Não só pelo número das variáveis envolvidas no processo, mas principalmente pela dificuldade na gestão dos dados, o processo de extrusão implica em uma grande dificuldade para o operador humano. Portanto para que se tenha um controle eficiente é necessário migrar o processo de controle do modo manual para um sistema de controle automatizado que utilize estratégias de controle baseadas em sistemas inteligentes e na manufatura avançada, e deste modo obter ações de controle rápidas e assertivas elevando a qualidade do produto extrudado.

3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO

O desenvolvimento de um sistema de controle depende inicialmente de um processo de identificação com relação ao nível das interferências das perturbações que influenciam o processo produtivo e operacional. Para que um sistema de controle seja considerado eficiente é necessário que, além de identificar as interferências, seja capaz de monitorar as variáveis de forma precisa e confiável para que os dados possam ser processados e compreendidos. Basicamente a aquisição e o processamento de sinais devem ser baseados em uma estratégia de controle adequada para tipo de processo e produto (Abeykoon, 2016).

Perturbações ambientais ou na matéria-prima podem causar variações na pressão de saída do material extrudado pela matriz modeladora, e consequentemente variações nas dimensões e no peso do produto extrudado.

Atualmente as extrusoras podem ser equipadas com dois sistemas diferentes de controle de velocidade do parafuso helicoidal, o controle da velocidade através de um inversor de frequência para um motor elétrico de corrente alternada ou o controle de velocidade à partir de um conversor de corrente contínua. Ambos sistemas de controle são utilizados para auxiliar no controle do processo para um fluxo constante do material extrudado pela fieira modeladora. A realimentação para o sistema de controle de velocidade é realizada através de sensores.

Para atender o requisito de qualidade é importante desenvolver um sistema de controle que consiga manter o fluxo constante do material extrudado. Técnicas de controle baseadas na teoria de controle clássica não são recomendadas para aplicações não lineares. As extrusoras de borracha utilizam borracha fundida que possui um comportamento não linear e não newtoniano. Nesse caso recomenda-se utilizar um sistema de controle baseado em lógica nebulosa, devido a algumas vantagens em relação aos sistemas de controle clássicos, tais como: a simplicidade e a flexibilidade de

operação que permitem uma transição gradual dentro de um intervalo contínuo de operação (Abeykoon, 2016; Bilobrovec *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2010; Sampaio *et al.*, 2007).

A lógica nebulosa faz uso das informações qualitativas de forma rigorosa. Esta técnica é considerada uma ferramenta baseada em regras. Estas regras são capazes de traduzir e tratar de 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 Fig.3 (Oliveira *et al.*, 2010; Gomide *et al.*, 1995; Sellitto, 2002; Simões e Shaw, 2007).

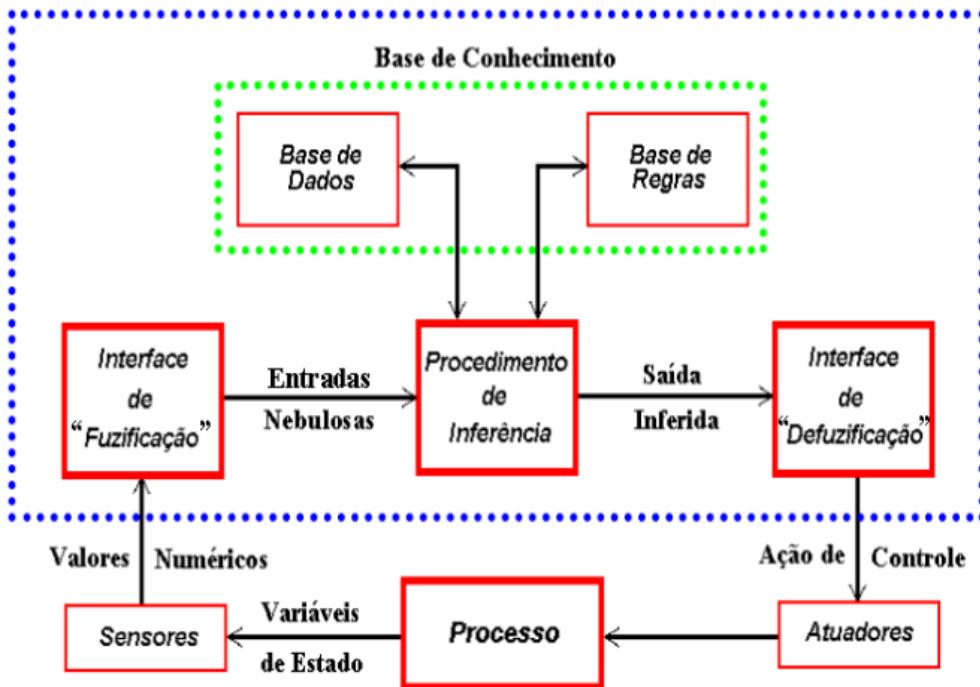


Figura 3. Blocos funcionais Controlador em Lógica Nebulosa. (Adaptado de Sandri e Correa, 1999)

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

Na base de conhecimento um conjunto de regras são definidas para estabelecer a relação de dependência entre as variáveis de entrada e saída. Por fim, converte-se os dados do sistema nebuloso através da *defuzzyficação* em um valor numérico aplicável ao sistema de 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 nessa pesquisa é chamado de método de *defuzzyficação* pelas alturas ou Centro-do-Máximo (C-o-M). Nesse método as áreas das funções de pertinência não interferem nas saídas, apenas os seus respectivos pontos máximos influenciam no resultado final (Simões e Shaw, 2007).

A coleta dos sinais dos sensores e o processamento dos sinais permitem a implementação da lógica nebulosa fisicamente implementada através do controlador da empresa Allen Bradley (família *ControlLogix 5561*). O controlador (modelo 1756L61) possui um sistema operacional multitarefa com capacidade de armazenamento de até 2Mbytes em memória RAM, e suporta endereçar grande quantidade de pontos de entradas e saídas (~128.000 digitais e ~4.000 analógicas).

Para o desenvolvimento da aplicação, além do controlador foi também utilizado uma interface gráfica para visualizar a resposta de saída do sistema de controle. Para isso dois programas foram utilizados (*RSLogix 5000* para a programação do controlador lógico programável e o *Factory Talk View* utilizado para a interface gráfica homem máquina configurada para a visualização de todos os parâmetros de controle da extrusora).

O transdutor utilizado para medição da pressão de saída do material extrudado foi o modelo *DYNA-4-3.5C-15/46*, que possui faixa de medição de 0 a 350 bar, sensibilidade de ~30mV/Bar. O sensor utilizado para a medição da temperatura ambiente foi o *RH TWM TRANSMITTER*, com faixa de operação de -10°C à +65°C e sinal de saída analógica de 4-20mA.

A extrusora utilizada possuía ~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 é de no máximo ~20 RPM, obtida através de um motor trifásico de corrente alternada com potência de 400HP e velocidade de rotação de 1.150 RPM.

Com base nas características da aplicação, o sistema de controle nebuloso desenvolvido e implementado nesta pesquisa apresenta possíveis melhorias com diferentes abordagens para a determinação dos parâmetros de controle, com o objetivo de monitorar constantemente o funcionamento da extrusora de borracha.

4. REGRAS APLICADAS AO SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO

Alguns processos industriais possuem um comportamento linear e por este motivo aplicam-se as técnicas de controle clássico no qual utiliza-se dos controladores do tipo *PID* (Controlador Proporcional, Integral e Derivativo). Entretanto, outros precisam de um modelamento matemático mais aprimorado, em alguns casos de difícil ajuste, e que podem demandar a extração do modelo matemático da planta de controle não-linear.

A extrusora de borracha devido ao comportamento da própria borracha necessita de constantes intervenções, devido ao comportamento não newtoniano da borracha processada no interior da extrusora.

A proposta da pesquisa visa o desenvolvimento e sua aplicação na prática industrial em um PLC de um sistema de controle automatizado baseado em lógica nebulosa, que há muitos anos marcam o desenvolvimento tecnológico em diversas aplicações na indústria moderna (Comenale e Wiltgen, 2022).

Nessa pesquisa, observa-se que a principal variável de saída a ser controlada é a pressão exercida sobre o material a ser extrudado. Com isso, são controladas duas variáveis de entrada, a temperatura ambiente e a viscosidade do material, e a pressão de saída serve como um sensor de realimentação do sistema de controle. Nas Fig. 4, 5 e 6 observa-se as funções de pertinência para cada uma das variáveis de entrada e de saída utilizadas nesse momento do desenvolvimento do sistema de controle, 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 utilizada nessa abordagem de controle nebuloso é do tipo triangular e definida como: da esquerda para a direita (*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*)), como pode ser visto na Fig 4.

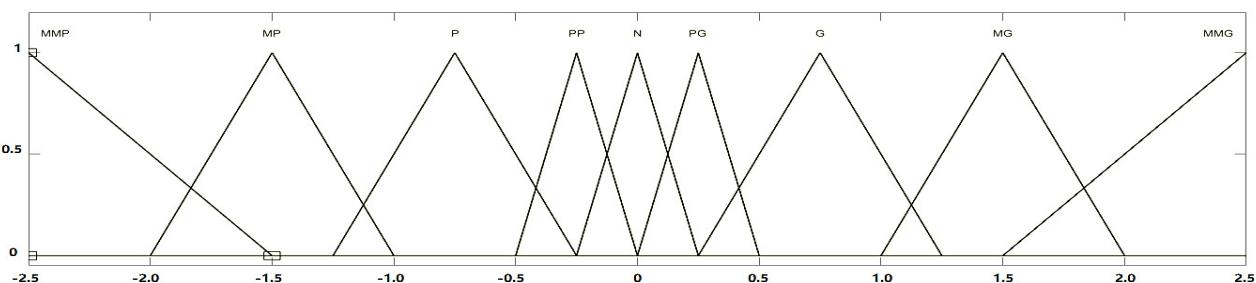


Figura 4. Função de pertinência para a pressão da extrusora. (Próprios Autores, 2021)

Para o controle da temperatura foi determinado uma faixa de controle de ~0°C à ~50°C, pois os valores de temperatura ambiente monitorados durante a realização dos estudos estão contemplados nessa faixa operacional. A função de pertinência é do tipo triangular e definida como: da esquerda para a direita (*FRIA* (*F*), *NORMAL* (*N*) e *QUENTE* (*Q*)), como pode ser visto na Fig 5.

Os compostos de borracha utilizados no processo de extrusão, são submetidos a testes e medições em laboratório para determinar suas respectivas viscosidades. 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 (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" tempo de funcionamento do rotor (minutos)) (Guerra et al., 2004).

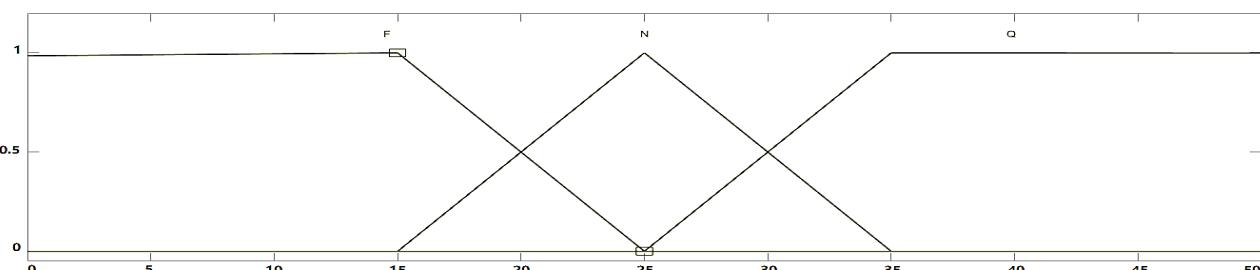


Figura 5 – Função de pertinência para temperatura ambiente. (Próprios Autores, 2021)

Após o viscosímetro atingir o valor máximo de viscosidade, inicia o processo de diminuição gradativa, influenciada pela característica da borracha e pela homogeneização da temperatura. Ao final dos testes, registra-se o valor instantâneo da viscosidade no momento a qual recebe o nome 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 de borracha que será utilizado no processo de extrusão para a fabricação.

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 Fig. 6 observa-se a função de pertinência do tipo triangular e definidas como: da esquerda para a direita (**BAIXA (B)**, **NORMAL (N)** e **ALTA (A)**).

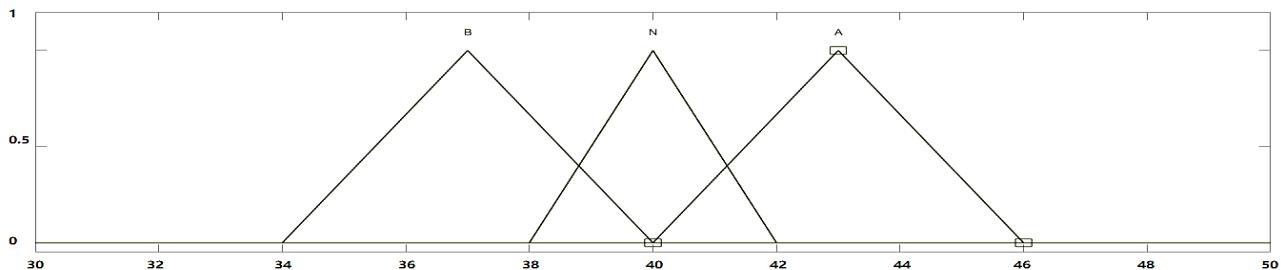


Figura 6 – Função de pertinência para a viscosidade. (Próprios Autores, 2021)

5. TESTES E RESULTADOS

O sistema de controle em lógica nebulosa foi implementado em uma extrusora de parafuso simples, com ~200mm de diâmetro e uma vazão de ~30kg/min de borracha extrudada. Para verificar a abrangência da solução adotada, o sistema de controle foi submetido a testes de diferentes lotes de materiais, a fim de verificar o comportamento do sistema quando submetido a diferentes tipos e níveis de perturbações.

Para que o sistema de controle nebuloso seja considerado funcional, as variações no processo produtivo não devem ultrapassar a 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.

Os testes realizados foram executados em duas etapas. Na etapa inicial foi desenvolvido um sistema de controle nebuloso e todas variáveis possuíam 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 Fig. 7 é possível verificar o sinal referente ao comportamento do peso do material extrudado sobre a balança dinâmica de linha. A linha na cor verde indica o peso real do material, quando este percorre a plataforma da dinâmica. As linhas na cor amarela delimitam as variações admissíveis do peso do material extrudado. Entre as linhas amarela e vermelha, tanto na parte superior quanto na inferior, são áreas que representam que o peso do material sofreu uma maior variação, mas ainda assim, é considerado aceitável, neste caso existe a tendência que o peso do material ultrapasse os limites e o peso assuma valores fora das especificações 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.

É possível notar, a instabilidade no peso do material devido as 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, consequentemente de elaborar uma boa estratégia de controle nas correções das interferences.

Posteriormente foram configurados novos e diferentes níveis de relevâncias para as variáveis de controle. Com isso foi observada uma maior estabilidade no fluxo de saída do material extrudado e consequentemente o peso final do produto dentro da tolerância especificada.

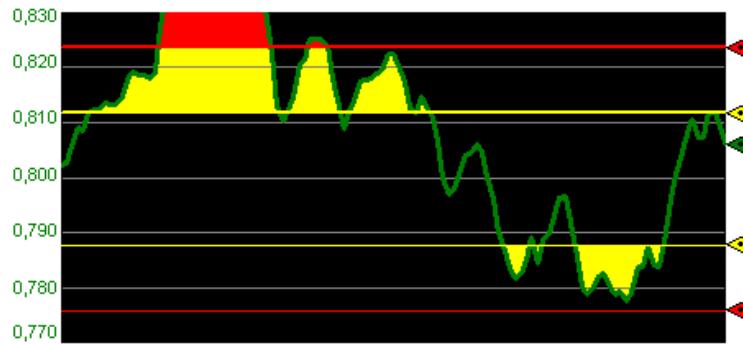


Figura 7 – Sinal do sistema de controle nebuloso atuando na extrusora fora dos parâmetros normais de funcionamento. (Próprios Autores, 2021)

Nas Fig. 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 implicando 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 Fig. 8 e 9 um comportamento mais estável do sistema de controle nebuloso (entre as linhas amarelas).

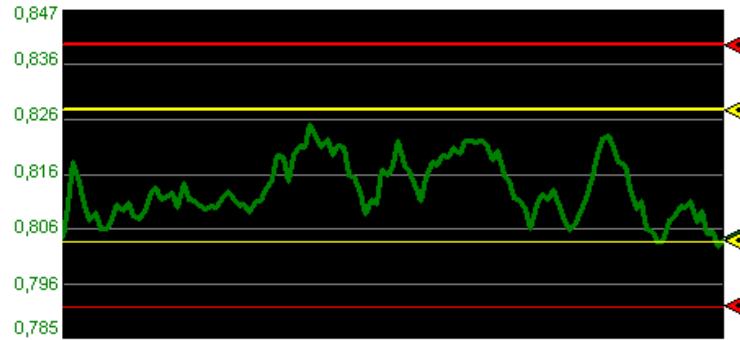


Figura 8 – Sinal do sistema de controle nebuloso atuando na extrusora de forma coerente. (Próprios Autores, 2021)

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-se no controle da velocidade do parafuso da extrusora controlando dessa forma o fluxo contínuo do material extrudado.

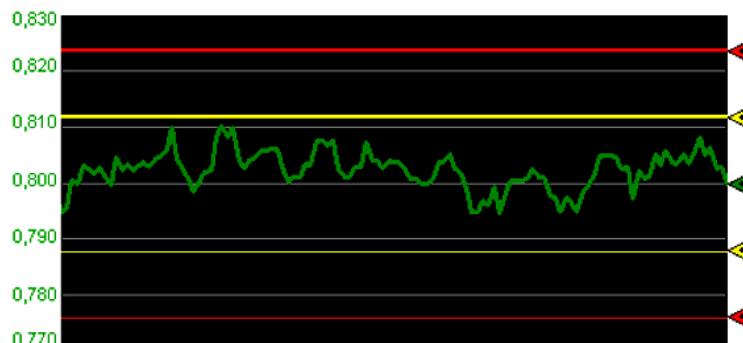


Figura 9 – Sinal do sistema de controle nebuloso atuando na extrusora de forma coerente e atenuada. (Próprios Autores, 2021)

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

Na Fig. 9, observa-se o resultado do segundo teste do sistema de controle nebuloso operando com peso de ~0,8kg, pressão de ~60Bar, temperatura ambiente de ~25°C e viscosidade de 43,7MU. Nessa condição, as variações foram inferiores a ~3% em relação ao valor do peso ajustado. Evidenciando um controle coerente e atenuado do processo.

6. PERSPECTIVAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de controle nebuloso proposto inicialmente apresentou algumas limitações de desempenho, sendo necessários diversos ajustes em cada uma das variáveis utilizadas. Com o controle do fluxo de saída do material extrudado mais estável, houve uma redução de ~50% na amplitude das variações admissíveis do peso do produto extrudado.

Assim sendo, nota-se que os primeiros resultados do sistema de controle nebuloso proposto para a pesquisa se mostra promissor. As etapas do desenvolvimento do sistema de controle nebuloso são de fácil compreensão, e não dependem de conhecimentos matemáticos avançados, o que possibilita a continuidade do desenvolvimento no sistema implantado por engenheiros da planta. Em pesquisas futuras, outras variáveis que não foram exploradas podem melhorar significativamente o processo de extrusão.

A utilização deste modelo de sistema de controle nebuloso agrupa tecnologia na fabricação com uso de extrusoras de borracha, mostrando-se como uma boa abordagem para o aperfeiçoamento de inúmeros processos complexos e não-lineares, assim como, para aplicação em máquinas extrusoras de borracha que não possuem sistemas de controle modernos de fábrica.

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

7. 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, pp.8577-8582.
- Abeykoon, C.A. (2014A). Novel Model-Based Controller for Polymer Extrusion. IEEE Computational Intelligence Society. v.22(06), pp.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), pp.7113-7123.
- Abeykoon, C. (2016). Single Screw Extrusion Control: A Comprehensive Review and Directions for Improvements, University of Manchester. v.1, pp.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, pp.1-7.
- Carvalho J.D.V. (2007) Fabricação e Reciclagem de Pneus. Dossiê Técnico – Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Universidade de Brasília, pp.19.
- 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, pp.1-8.
- Comenale, W. e Wiltgen, F. (2022). Automação Industrial para a Manufatura Avançada com Apoio da Engenharia de Sistemas & Requisitos. Revista Mundi, aguardando publicação, pp.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, pp.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), pp.289-294.
- Junior, M.A.B., Soares, V.A., Gonçalves, G.J.C., Munhoz, M.R., Dias, L.G., Barbara, G.V. e Breganom, R. (2020). Implementação de um Controlador Fuzzy para Controle de Temperatura. Brazilian Journal of Development. v.6(06), pp.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. pp.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, pp.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, pp.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. 934p.
- 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, pp.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 Erro de Prediccción del Modelo. Ver. Ciencia e Ingenieria, v.25(01), pp.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. pp.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, pp.1-15.
- Sandri, S., Correa, C. (1999). Lógica Nebulosa. V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais, São José dos Campos, 19 de julho, pp.c073-c090.
- 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, pp.38-44.
- Sellitto, M. A. (2002). Inteligência Artificial: Uma Aplicação em uma Indústria de Processo Contínuo. Gestão & Produção. v.9(03), pp.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. Cad. Bra. de Ensino de Física. v.30(03), pp.614-627.
- Wiltgen, F. (2020). A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada. Rev. Tecnologia, v.41(02), pp.1-11.
- Wiltgen, F. (2021). Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas. 26º International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba, 18-22 setembro, pp.1-10.
- Yamashita, D.M. Compostos de Borracha. (2009). ITAL, Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens, v.21(01), pp.1-9.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.

FUZZY CONTROLLER FOR RUBBER EXTRUSORS

Wagner Comenale, WagnerComenale@hotmail.com¹

Filipe Wiltgen, LFWBarbosa@gmail.com²

¹Universidade de Taubaté, Wagner.Comenale@unitau.com

²Universidade de Taubaté, Filipe.Wiltgen@unitau.com

Abstract. This paper presents a research related to development of a fuzzy control system applied to single screw extruders for manufacture of automotive tires. As it is a process considered non-linear and subject to different external disturbances, the research to replace dependence on human knowledge by a system based on intrinsic knowledge translated in form of mathematical expressions into operating rules based on success and failure histories. in tire manufacturing. Despite many technological advances, most applications that use rubber extruders still have manual control systems and are dependent on experience of human operator. The control system to be applied in this research is based on artificial intelligence technique known as fuzzy logic that allows mathematical modeling of complex and non-linear problems through simple rules that allow development of a fuzzy controller implemented in industrial PLC (Programmable Logic Controller). This research was developed and tested in an industrial factory environment in an extruder with ~200mm in diameter intended for manufacture of automotive tires. The system uses as a reference output pressure of extruded material to control speed of extruder screw in such a way as to ensure that flow of extruded material is constant, and thus, consequently keeping final weight of extruded product constant, allowing manufacturing uniformity. The analysis of different variables involved in extrusion process allowed establishing different rules and pertinence functions for control fuzzy system. The system's stable behavior provides a reduction in raw material and electrical energy waste and increases production levels. It can be seen that the response fuzzy control system developed in the research was able to reduce by up to ~50% variations in the weight of extruded material, obtaining only ~3% of variation in relation to adjusted weight value, proving greater uniformity in manufacture extruded material parts of an automotive tire.

Keywords: Fuzzy Logic, Control Systems, Extruders, Advanced Manufacturing, Artificial Intelligence.