

SISTEMA FUZZY APLICADO À PRODUÇÃO DE VIDRO METALIZADO

PAULO CESAR DE MOURA*, LORIVAL RODRIGUES†, ERNESTO ARAUJO‡

* *Cebrace Cristal Plano Ltda.*
Caçapava, SP, Brasil

† *Kodak do Brasil*
São José dos Campos, SP, Brasil

‡ *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE*
Laboratório de Integração e Testes - LIT
São José dos Campos, SP, Brasil

Emails: paulo.moura@pilkington.com.br, lorival@kodak.com.br,
ernesto.araujo@lit.inpe.br

Abstract— A fuzzy supervisory system for vacuum sputtering process employed in the coating of glass by tin oxide thin layer (S_nO_2) is proposed in this paper. This process presents pressure variation due to the continuous moving of plate glass into a vacuum sputtering chamber during glass coating and so modifying the metal deposition rate resulting in glass products not within specification. The deposition control of tin oxide (S_nO_2) requires that operators have to constantly control the system to keep the deposition homogeneous. Dealing with this process is not a trivial task due to the time-delay response of the process caused by pressure inside the vacuum chamber, nonlinear characteristics, and the dimensional differences among the production supplies, resulting in significant loss of productivity, raw materials and finished goods. Fuzzy systems have received particular attention due to their potential to approximate nonlinear behavior. Furthermore, the use of fuzzy logic in the design of the proposed system permits the use of the operators' knowledge of the overall production stages, from initial parameters setup to stable operational conditions, by taking into account all the variables present to describe the process. Achievable results in the pilot production line, justify the use of fuzzy supervisory systems as a feasible alternative for solving the problem.

Keywords— Fuzzy Control, Glass Manufacturing, Vacuum Plating Process

Resumo— Um sistema supervisório difuso para o processo de metalização a vácuo usado na fabricação de vidros revestidos com película de óxido de estanho (S_nO_2) é proposto neste artigo. Este processo apresenta variação da pressão provocada pelo contínuo movimento de chapas de vidro dentro da câmara de metalização durante o revestimento do vidro alterando a taxa de deposição do metal e assim gerando produtos fora da especificação. O controle da deposição de óxido de estanho (S_nO_2) requer que operadores atuem constantemente no sistema para manter uma deposição homogênea. Lidar com este processo não é uma tarefa trivial devido ao atraso na resposta do sistema provocado pela pressão da câmara de vácuo, características não-lineares e das diferenças dimensionais entre os lotes de produção, causando perda de produtividade, material em processo e produto acabado. O uso de sistemas difusos tem recebido particular atenção devido a sua potencialidade de aproximar comportamentos não-lineares. Adicionalmente, a aplicação lógica difusa no projeto do sistema proposto permite o aproveitamento da base de conhecimento do operador para todas as etapas de produção, desde os ajustes dos parâmetros de funcionamento (*setup*) inicial até o regime estável de produção, considerando todas as variáveis envolvidas na descrição do processo. Os resultados alcançados durante a produção piloto, justificam a escolha do sistema supervisório difuso como uma das possíveis alternativas para solucionar o problema.

Keywords— Controle difuso, fabricação de vidros revestidos, metalização a vácuo

1 Introdução

Neste trabalho a lógica difusa mostra ser uma alternativa auxiliar para produção de vidros reflexivos de alto desempenho atualmente conduzidos por operadores humanos. Através de um sistema difuso de suporte a decisão é possível tornar o processo automático em um ambiente que apresenta incerteza e imprecisão devido as características dinâmicas de câmaras de vácuo e troca de calor.

Vidros reflexivos de alto desempenho com propriedades de filtragem da energia solar incidente, refletindo o calor e luz e bloqueando a onda ultravioleta são largamente utilizados. Este produto é composto de um vidro comum com revestimento de uma película metálica em uma das faces. De-

pendendo da característica ou desempenho solicitado, o vidro pode ser revestido, p.ex., por uma película de titânio, cromo, aço inox ou estanho.

O revestimento obtido através da metalização do vidro é realizado dentro de uma câmara de vácuo onde o metal formador da película é vaporizado. Entende-se por vaporizar a retirada de partículas do tamanho de um átomo de uma barra de metal fixada a um elemento catodo para, em seguida, ser depositado sobre uma superfície desejada (Fig. 1). Ao se desprender do metal, esta partícula é atraída para a superfície do substrato (vidro), onde se alojará nos poros existentes devido a uma irregularidade natural na sua formação, permitindo o surgimento de uma película metálica. Em todo o processo esta vaporização é crítica devido a instabilidade da pressão interna

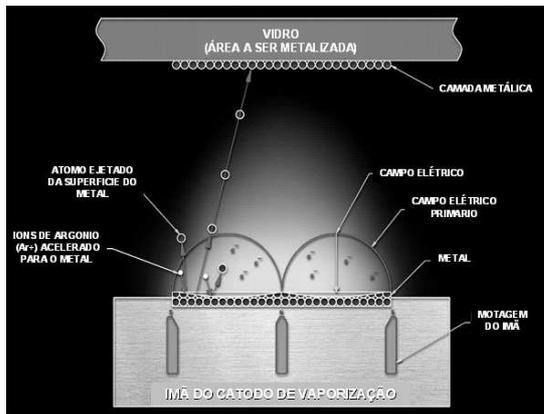


Figura 1: Processo de deposição metálica em vidros planos.

da câmara que ocorre quando o substrato é introduzido para ser metalizado. Esta instabilidade é um dos principais aspectos a ser considerado na linha de produção porque induz a perturbações no processo. Um outro problema é a alteração da condutividade elétrica que desestabilizará o plasma – responsável pela reação iônica com o metal e provoca a liberação de átomos. A instabilidade do plasma, por sua vez, altera a taxa de vaporização do metal que, dependendo da taxa obtida, pode gerar produtos fora de especificação.

De forma a antecipar as conseqüências causadas por estas instabilidades, faz-se necessário a atuação constantemente de um operador humano no sistema para que a vaporização seja homogênea. O manuseio e monitoração deste processo é complexo devido, entre outras coisas, às diferenças dimensionais entre os lotes de substrato. Adicionalmente, a resposta do processo para manter as variáveis que determinam o comportamento dinâmico do sistema dentro das especificações apresenta atraso de resposta. Estas diferenças exigem atuações diferentes para cada lote de produção, fazendo com que o sistema seja dependente da atuação do operador a cada instante. Estas características causam queda de produtividade, produto acabado fora da especificação e perda de matéria prima utilizada no processo.

Algumas alternativas de automação já existentes na fabricação de vidro reflexivo são complexas e resolvem parcialmente o problema. O uso de técnicas de computação inteligente é também uma realidade na fabricação de vidro de uma forma geral (Falkus et al., 1994; Hadjili et al., 1998; Hurtig and Yurkovich, 2001; Jung and Lee, 1993; Murad et al., 1993; Moon and Lee, 2000; Moon et al., 2000; Moon and Lee, 2003; Yext et al., 1983). Em particular, ênfase nas técnicas utilizando lógica nebulosa foi pesquisada, mas nenhuma delas lida especificamente, e de forma direta, com o problema que se propõe solucionar. Todavia estas soluções apontam para a viabilidade

de se utilizar lógica difusa na automação da linha de produção de vidros reflexivos.

Este trabalho tem como propósito projetar um sistema difuso supervisor para o processo de metalização a vácuo usado na fabricação de vidros revestidos com película de Óxido de Estanho S_nO_2 . Através do método proposto, se pretende alcançar a estabilidade do processo, redução de custo através da eliminação das perdas, busca de qualidade, e maior produtividade.

2 Metalização de Vidros Reflexivos com Película de Óxido de Estanho (S_nO_2)

O sistema de metalização de vidros reflexivos com película de Óxido de Estanho (S_nO_2) é composto por uma câmara de metalização a vácuo, subdividida em 5 compartimentos, (1) Câmara de entrada, (2) Câmara de transferência de entrada, (3) Câmara de deposição (onde ocorre o processo de metalização), (4) Câmara de transferência de saída e (5) Câmara de saída, conforme mostrado na Fig. 2

As câmaras de entrada e saída, possibilitam a transição da chapa de vidro do ambiente de pressão atmosférica para o ambiente de vácuo e vice-versa, sendo esta transportada por meio de rolos para dentro e fora da câmara de metalização, respectivamente. Este processo precisa ser feito sem causar instabilidade no vácuo da câmara de metalização. Para isto, as câmaras de entrada e saída são isoladas por válvulas de bloqueio, cuja função é manter a câmara de entrada de transferência com vácuo durante a transição.

A formação da camada metálica depende de condições pré-estabelecidas no interior da câmara de vácuo, tais como, pressão interna, fluxo de argônio para formar o plasma, tensão elétrica aplicada no catodo, fluxo de corrente elétrica no catodo, fluxo dos gases reagentes (oxigênio e nitrogênio) para formação de óxidos, e da velocidade que o vidro é transportado dentro da câmara. Estes fatores irão determinar a espessura e a homogeneidade da camada metálica formada. Após ajustes dos parâmetros de funcionamento (*setup*), a produção é inicializada e as chapas são metalizadas seqüencialmente em função destes parâmetros.

Devido à instabilidade gerada pela variação da pressão dentro da câmara de vácuo – que é provocada pela continua passagem das chapas de vidro que serão metalizadas – a taxa de deposição dos elementos (átomos) é alterada, gerando-se assim produtos fora da especificação; sendo a deposição de óxido de estanho, S_nO_2 , a mais afetada por esta variação. Desta forma, um operador manipula a intensidade do plasma, atuando no sistema com base em sua experiência para manter uma deposição homogênea.

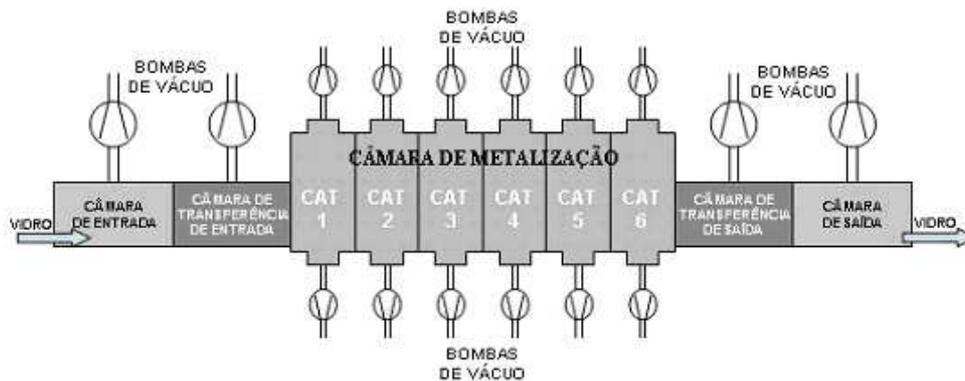


Figura 2: Esquema do sistema da Câmara de Metalização a Vácuo.

3 Sistema Difuso para Processo de Metalização a Vácuo

O operador, que é responsável pela decisão, recebe todas as informações via uma Interface Homem Máquina (IHM) do sistema de monitoramento e, com base no seu conhecimento, faz os ajustes nos valores de referência para controlar a densidade do plasma dentro da câmara de deposição (Fig. 3).

O sistema atual que produz e mantém o plasma em níveis desejados não é capaz de evitar que as variações do processo interfiram nas características finais do produto. No início da produção, a câmara de metalização a vácuo está vazia. Nesta condição o plasma é estável em função da pressão interna da câmara ser estável também. Ao introduzir na câmara as primeiras chapas de vidro, a pressão começa a subir devido a redução de volume da câmara e também da abertura da válvula da câmara de transferência que está com a pressão maior que a da câmara de deposição. O operador, baseado em sua experiência, tenta recuperar a intensidade do plasma diminuindo a vazão de oxigênio, para compensar o aumento da pressão na câmara de vácuo. Para isto, atua reduzindo o fluxo de oxigênio, O_2 , injetado na câmara, para compensar a alteração que a corrente elétrica, i_e , sofre com o au-

mento da pressão, antecipando desta forma a resposta do processo. Esta ação resulta no controle da taxa de deposição metálica que afeta a espessura da camada metálica. A espessura da camada metálica é uma medida indireta, resultado este obtido através da leitura das características ópticas do vidro, realizadas pelo espectrofotômetro. Como é possível observar no gráfico de transmissão luminosa (Fig. 4) que corresponde a espessura do material, a partir do pico máximo de espessura da camada na 30ª amostra verifica-se que ela decresce exponencialmente conforme a câmara de vácuo vai sendo ocupada pela chapa de vidro. Isto ocorre devido a pressão interna da câmara que aumenta. Todavia, há um atraso para a reação do operador, que depende da capacidade de compreender as informações de pressão inicial, tamanho da chapa, espessura da chapa etc. Desta forma, o sistema atual tem deficiência em manter a espessura em um nível desejado.

Por outro lado, algumas variáveis de controle e algumas interferências, tais como, atraso da resposta do controle no tempo, não-linearidades, variação nas dimensões das chapas e variação de pressão, fazem com que um controle em malha fechada que utilizem técnicas de controle convencionais não seja uma alternativa viável para este tipo de processo.

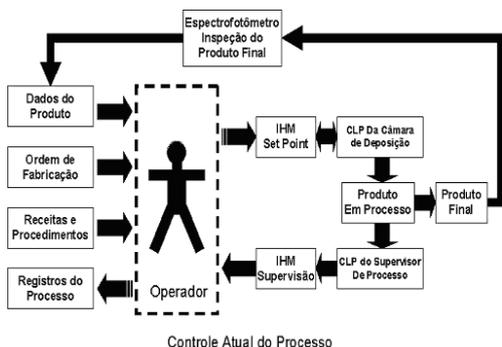


Figura 3: Atuação do Operador no Controle.

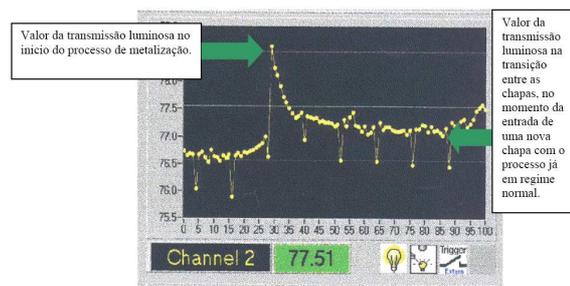


Figura 4: Variação da Transmissão Luminosa no início da produção.

Neste artigo um novo mecanismo é desenvolvido a fim de fornecer informações aos operadores do processo de metalização de vidros reflexivos para auxiliá-los a decidir sobre ações específicas e para obter um melhor rendimento do sistema. Esta abordagem incorpora um sistema supervisorio difuso de decisão para o ajuste da densidade do plasma dentro da câmara de deposição. O uso da lógica nebulosa permitirá o aproveitamento da base de conhecimento do operador relativa a todas as etapas de produção, desde os ajustes dos parâmetros de funcionamento (*setup*) inicial até o regime estável de produção, considerando todas as variáveis envolvidas no processo. Com isto, o método proposto pode aumentar o desempenho do sistema de produção ao lidar com variação nas dimensões das chapas e variação de pressão.

3.1 Especificação do Sistema Difuso Proposto

Para manter a espessura da camada metálica uniforme por toda superfície do vidro as atuações dos operadores geralmente são feitas na intensidade do fluxo de corrente elétrica, i_e , do catodo (produtos metálicos) e, para produtos óxidos, na vazão de oxigênio, O_2 .

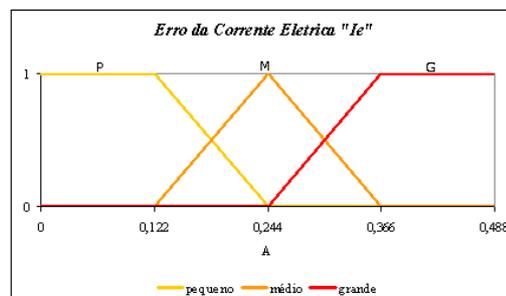
Quando o fluxo de oxigênio é mantido constante, a corrente diminui à medida que a chapa de vidro entra na câmara de metalização. A consequência da diminuição da corrente quando a chapa de vidro entra é o aumento da transmissão luminosa (Y) devido a redução da taxa de metalização, indicando que a espessura da camada metálica está diminuindo.

Para minimizar o nível da queda da corrente elétrica, i_e , o operador antecipa a correção, reduzindo o fluxo de oxigênio, O_2 , para manter a pressão interna estável. Logo após a correção no fluxo de oxigênio, o operador consegue retornar a transmissão para o valor especificado.

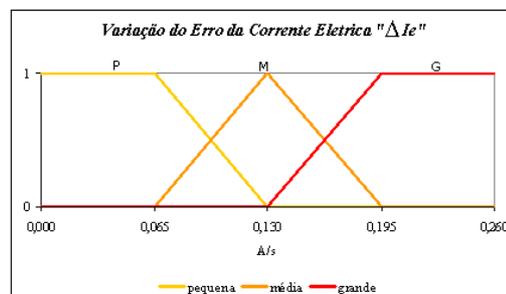
Assim, enquanto variáveis linguísticas de entrada relacionadas com o comportamento dinâmico do plasma são (i) corrente elétrica, i_e , (ii) variação da corrente elétrica, Δi_e , (iii) variação da tensão elétrica, Δv_e , a variável linguística de saída é dada por O_2 .

3.2 Termos linguísticos e Variáveis Linguísticas de Entrada

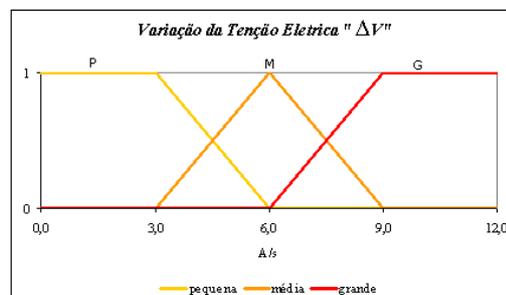
A variável linguística do erro da corrente, i_e , foi escolhida por representar a reflexão luminosa, uma característica de destaque para o processo produtivo. O limite de tolerância para esta variável é de 1,2%. A cada 0,328% de variação na reflexão luminosa equivale a uma variação de 0,1 A na corrente. Um erro de $\pm 0,366$ A na corrente, provocaria um produto fora da especificação. Com base na experiência do operador, foram definidos os níveis para os termos linguísticos designados por



(a) Variável linguística corrente elétrica, i_e .



(b) Variável linguística variação da corrente elétrica, Δi_e .



(c) Variável linguística variação da tensão elétrica, Δv .

Figura 5: Funções de pertinência de entrada do sistema difuso para metalização de vidros reflexivos

P (positiva), M (media) e G (grande), conforme Fig. 5(a).

O universo de discurso definido para a variável linguística relacionada à variação do erro de corrente elétrica, Δi_e , corresponde à proximidade da chapa de vidro ao plasma. Pela experiência do operador, as maiores variações na corrente elétrica ocorrem quando a chapa esta chegando próxima do plasma, resultando em uma variação na deposição na borda do vidro. Os níveis de variação foram definidos pelo limite máximo de falta de homogeneidade da borda. Como o limite de tolerância para variável de referência é de 1,2% e para cada 0,328% equivale a 0,1A, uma variação do erro de 0,366 A em 1,88s seria iguala a 0,195A/s, o que provocaria um produto fora da especificação. Os termos linguísticos para esta variável são designados por variação P (positiva), M (media) e G (grande) e podem ser visualizados pela Fig. 5(b).

O valor da variável linguística relacionada à variação da tensão elétrica, Δv , determina o ponto

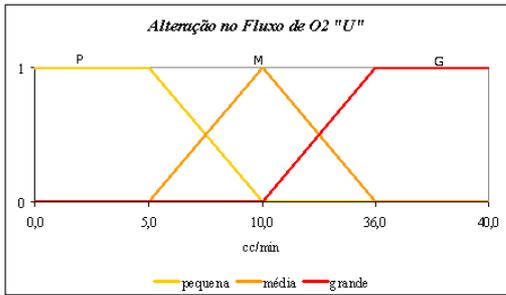


Figura 6: Funções de pertinência de saída do sistema difuso para metalização de vidros reflexivos

de operação do sistema. Os termos lingüísticos para esta variável são designados por variação PP (positiva pequena), PM (positiva média) e PG (positiva grande), para situações normais de operação e uma variação NP (negativa pequena), NM (negativa média) e NG (negativa grande), indicam que o sistema está saindo da região de operação de trabalho. A inversão do ponto de operação é muito rápida e quando a variação representa uma elevação acima de 10V/s na tensão de trabalho, ocorre um efeito conhecido como "avalanche" (aumento repentino da tensão) e o processo é interrompido gerando perda de produção. Os termos lingüísticos para variação positiva utilizados para a variação da tensão elétrica estão na Fig. 5(c).

3.3 Termos lingüísticos e Variável Lingüística de Saída

Sendo um dos componentes reagentes do plasma na formação de película metálica de óxido de estanho (S_nO_2), o oxigênio assume um papel vital no controle da metalização. Os termos lingüístico para esta variável de saída (redução de O_2) podem ser grande, média ou pequena, dependendo das condições do processo. Esta tomada de decisão leva em consideração as pressões iniciais da câmara, que varia de um dia para o outro, as dimensões das chapas de vidro, o tempo de vida da barra de metal afixada ao catodo (matéria prima) e a velocidade com que a chapa passa pela câmara de deposição. A vazão média de O_2 para os produtos de óxido de estanho é de 360 cc/min. Pela experiência do operador, uma ação de 10% deste valor para mais ou para menos significaria uma ação do tipo grande. Esta ação de controle geralmente é utilizada para recuperar o ponto de operação quando ocorre a inversão da variação da tenção. Para correção do tipo pequena, o operador utiliza uma ação de 5cc/min para mais ou para menos, e para correção do tipo média, utiliza uma ação de 10cc/min para mais ou para menos. Estas ações podem ser verificadas no gráfico da Fig. 6.

3.4 Mecanismo de Inferência, Operadores Conectivos e Estrutura do Controlador Difuso

O valor preciso resultante de saída do sistema supervisorio difuso é obtido através da união dos conjuntos difusos que é decodificada (defuzificada) pelo calculo do método de centro-de-área. Estes conjuntos difusos são obtidos após se aplicar a base de regra difusa e pelo mecanismo de inferência que fornece uma saída para cada entrada mensurada. O mecanismo de inferência escolhido é o método direto Mamdani devido a facilidade de representar a descrição dos operadores. Foram utilizadas para isto a T-norma e a T-conorma, respectivamente, min e max. A estrutura do controlador difuso resultante é fornecida a seguir:

$$\begin{aligned} R_{C_i} : SE \ x_1 \ é \ M_{i1} \ E \ x_2 \ é \ M_{i2} \ E \ x_3 \ é \ M_{i3} \\ ENTÃO \ y_i(t) = C_i . \end{aligned} \quad (1)$$

tal que a i -ésima regra (implicação) é representada por R_{C_i} , com $i = 1, 2, \dots, N_r$, sendo N_r o número máximo de regras difusas; $y_i(t)$, a saída da i -ésima regra; $x_1(t) = i_e$, $x_2(t) = \Delta i_e$, e $x_3(t) = \Delta v_e$, variáveis de estado; M_{ip} , a p -ésima função de pertinência da i -ésima regra que particiona o universo de discurso de entrada (Fig. 5); e $C_i(x(tq))$, a q -ésima função de pertinência da i -ésima regra que particiona o universo de discurso de saída dado pela variável lingüística de saída, O_2 (Fig. 6).

4 Resultado Principal

Com o auxilio de um sistema supervisorio difuso operando em paralelo ao sistema atual foi verificado a resposta do sistema comparando a saída do sistema difuso proposto com a saída obtida pelo operador. É possível perceber que o método proposto mostrou a mesma tendência de comportamento da variável de saída comparado com o sistema controlado pelo operador, conforme pode ser observado nos gráficos das Fig. 7.

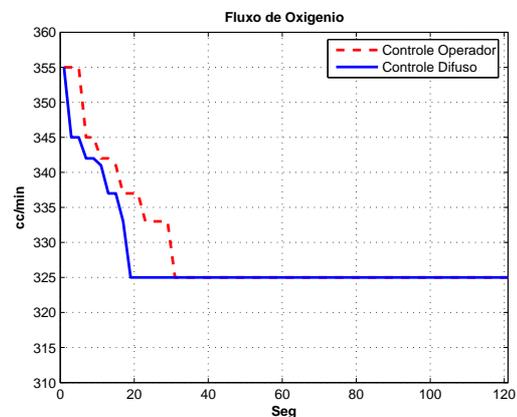


Figura 7: Resposta do sistema controlado pelo operador em comparação ao controle difuso.

Tabela 1: Comparação de desempenho de controle por operador e controle difuso.

	Operador	Fuzzy
ISE	$6,609 \times 10^6$	$6,544 \times 10^6$
ITSE	$200,735 \times 10^6$	$200,156 \times 10^6$
IAE	$20,073 \times 10^3$	$19,977 \times 10^3$
ITAE	$616,076 \times 10^3$	$615,206 \times 10^3$

Adicionalmente, uma resposta mais rápida em relação ao operador pode ser verificada, e a especificação técnica é atingida na primeira chapa durante o ajuste dos parâmetros de funcionamento *setup*. A comparação dos resultados pode ser obtida também através do uso dos índices de desempenho integral do erro quadrático (ISE), integral do erro quadrático ponderado pelo tempo (ITSE), integral do valor absoluto do erro (IAE), integral do valor absoluto do erro ponderado pelo tempo (ITAE), conforme mostrado na Tabela 1. Os resultados apresentados indiquem o melhor desempenho da técnica apresentada comparada com a operação manual utilizada. Desta forma, com os resultados alcançados durante a produção piloto, se justifica a escolha do sistema supervisorio difuso de apoio ao operador como uma das possíveis alternativas para solucionar o problema.

5 Conclusões

O controle utilizando lógica nebulosa permitiu que toda a base de conhecimento do operador fosse utilizada desde o ajuste dos parâmetros de funcionamento *setup* inicial até o regime de produção, das camadas metálicas de Oxido de Estanho, S_nO_2 , considerando todas as variáveis do processo. A lógica difusa mostrou-se capaz de lidar com as incertezas e não-linearidade do processo, tratando as incertezas com base na experiência do operador e atingindo um resultado superior quando comparando ao modelo de controle atual.

Os resultados justificam a escolha do controle difuso como uma das possíveis alternativas para solucionar o problema. O vidro metalizado na produção piloto atendeu a especificação, pois a variação permitida é de $\pm 1,2$ e a variação obtida foi de $\pm 0,26$. Esta nova abordagem utilizada, permitiu substituir o ser humano na tarefa de modificar o fluxo de O_2 , mantendo o plasma estável durante a transição das chapas de vidro na câmara de metalização, possibilitando obter resultados mais seguros, eficientes, com maior qualidade e menor custo.

Trabalhos futuros prevêem a utilização de ferramentas de computação inteligente na otimização e sintonia do controlador difuso. Da mesma forma, se preve o uso de tais técnicas na modelagem do processo de produção de vidro metalizado para o projeto de um controle difuso.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Cebrace Cristal Plano Ltda. por permitir o trabalho e pesquisa acadêmica na sua linha de produção em vidros revestidos com película de óxido de estanho.

Referências

- Falkus, H., Damen, A. and Backx, T. (1994). Disturbance modeling in a tube glass production process, *American Control Conf.*, Vol. 2, ACC, Baltimore, Maryland, pp. 2020–2024.
- Hadjili, M., Lendasse, A., Wertz, V. and S.Yurkovich (1998). Identification of fuzzy models for a glass furnace process, *Intern. Conf. on Control Applications*, Vol. 2, IEEE, Trieste, Italy, pp. 963–968.
- Hurtig, J. and Yurkovich, S. (2001). Parameter set estimation for nonlinear systems, *Southeastern Symposium on System Theory*, IEEE, Athens, Greece, pp. 275–280.
- Jung, K.-M. and Lee, K.-S. (1993). A decision support system using neural networks in a glass furnace process, *Intern. Joint Conf. on Neural Networks*, Vol. 3, IEEE, Nagoya, Japan, pp. 2795–2798.
- Moon, U.-C. and Lee, K. Y. (2000). Temperature control of glass melting furnace with fuzzy logic and conventional pi control, *American Control Conf.*, Vol. 4, ACC, Chicago, Illinois, pp. 2720–2724.
- Moon, U.-C. and Lee, K. Y. (2003). Hybrid algorithm with fuzzy system and conventional pi control for the temperature control of tv glass furnace, *IEEE Trans. Control System Technology* **11**(4): 548–554.
- Moon, U.-C., WhoJoung-Li, WanJu-Koon and Lee, K. Y. (2000). Multi-loop control of temperature for tv glass furnace, *Conf. on Decision and Control*, Vol. 5, IEEE, Sydney, Australia, pp. 1–4.
- Murad, G., Postlethwaite, I., Gu, D.-W. and Whidborne, J. (1993). Robust control of a glass tube production process, *Improvements in Furnace Control: Current Developments and New Technologies*, IEE, London, UK, pp. 1–4.
- Yext, W. F., Shook, B. J., Katzenberger, W. S. and Michalek, R. C. (1983). Improved glass-metal sealing through furnace atmosphere composition control, *IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* **6**(4): 455–459.