Projeto de Controle *Fuzzy* para Aprimorar a Eficiência Energética de Secadores Rotativos

Modesto P. Júnior * Santino M. Bitarães **
Thiago A. M. Euzébio **

* *Schneider Electric Brasil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, (e-mail: modesto.junior@se.com).*

** *Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, MG, (e-mail: santinobitarães@gmail.com, thiago.euzébio@itv.org)*

Abstract: This article describes a *fuzzy* control project for rotary drying. The goal is to reduce the energy consumption of the process without losing the quality of the final product. Different from other approaches, the proposal takes into account, the difficulties of the modeling process and the instrumentation limitations in the industrial reality. According to the results, *fuzzy* control implementation reduces the consumption of biomass by 9%, which represents an annual reduction of 648 tons of carbon dioxide emissions (CO_2) to the atmosphere.

Resumo: O projeto de um controle *fuzzy* para secagem rotativa é descrito nesse artigo. O objetivo é reduzir o consumo de energia do processo sem perder a qualidade do produto final. Diferente de outras abordagens, a proposta desse artigo leva em consideração as dificuldades da modelagem do processo e as limitações de instrumentação na realidade industrial. De acordo com os resultados, a implantação do controle *fuzzy* reduziu em 9% o consumo de biomassa, o que representa uma redução anual de 648 toneladas de emissão de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera.

Keywords: *Fuzzy* Control; Rotary Dryer; Energy Efficiency.

Palavras-chaves: Controle *Fuzzy*; Secador Rotativo; Eficiência Energética.

1. INTRODUÇÃO

Secagem rotativa de granulados é um método de secagem usado em indústrias diversas. Na literatura há exemplos nas indústrias de mineração (Wu et al., 2010), de processamento de produtos agrícolas (Delele et al., 2015) e de químicos e fertilizantes (Arruda et al., 2009). O objetivo primário da secagem é o de reduzir a umidade do material processado. Assim, é possível retardar a deterioração biológica ou química dos produtos. Outro benefício é que o produto seco diminui sua densidade aparente, o que reduz custos de transporte.

A umidade é retirada dos granulados por troca de calor. Uma corrente de ar quente é forçada a ter contato com o granulado úmido dentro do secador. O secador gira continuamente para aumentar a superfície de contato entre o ar quente e o material úmido, por isso o nome secador rotativo. De acordo com Mujumdar (2014), a eficiência térmica de secadores rotativos está na faixa de 30 a 60%.

Questões operacionais podem levar o sistema de secagem a um baixo desempenho energético. A taxa mássica, umidade e granulometria do produto variam com o tempo, por consequência, o valor de carga térmica requerida para a secagem também varia com o tempo. A biomassa usada na queima na fornalha tem variações granulométricas e

de umidade que afetam a temperatura do gás quente que alimenta o secador. Caso ajustes operacionais contínuos não sejam feitos, o sistema consome mais biomassa que o necessário ou produz um material fora da especificação de umidade.

É prática comum na indústria que as variáveis operacionais de um sistema de secagem rotativa sejam controladas por operadores em uma sala de controle. A eficiência da operação fica, portanto, dependente do conhecimento do operador do turno. Essa estratégia, além de promover uma despadronização de ações, é refém de tomadas de decisões erradas ou atrasadas. Uma estratégia alternativa é a aplicação de controle avançado (Yliniemi et al., 1998; Didriksen, 2002; Ortega et al., 2007; Pablo et al., 2016) para que o sistema de secagem rotativa opere de modo automático e com menor intervenção humana.

Esse artigo apresenta o projeto de um controle *fuzzy* e os resultados de sua aplicação em uma planta de secagem rotativa de fertilizantes. O controlador projetado funciona em uma camada acima da camada básica de controle regulatório já existente na planta. O objetivo é reduzir o consumo de energia pela queima de biomassa sem perda de qualidade do produto processado. Diferente das técnicas existentes na literatura, a proposta de controle desse artigo independe do modelo do processo, a instrumentação necessária é básica e de baixo custo, e a razão estequiométrica é uma variável manipulada.

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Além da Introdução, esse artigo é formado por outras seis seções. A Seção 2 descreve as características das principais contribuições na literatura de controle avançado para secadores rotativos. A planta estudada nesse artigo é descrita na Seção 3. As estratégias de controle regulatória e a *fuzzy* proposta são detalhadas nas Seções 4 e 5, respectivamente. Os resultados da aplicação do controle *fuzzy* e a análise com resultados da estratégia com controle regulatório são descritos na Seção 6. Os comentários finais estão na Seção 7.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde o início dos estudos formais sobre o controle de secadores rotativos, muitas técnicas de controle foram propostas. Nesta seção, as técnicas mais citadas na literatura são detalhadas. Todas essas abordagens apresentam algumas vantagens e limitações.

Uma estrutura de controle híbrido aplicada a uma planta piloto de secador rotativo foi proposta por Yliniemi et al. (1998). A única variável manipulada nessa estrutura é a vazão de combustível. As variáveis monitoradas são a temperatura do ar seco e a umidade do material na entrada e na saída do secador. A razão estequiométrica de ar/combustível e a vazão do ar de exaustão não são consideradas nessa estrutura de controle.

Em (Didriksen, 2002) um controlador preditivo por modelo é estudado para o caso de um secador rotativo de uma indústria de açúcar. A temperatura do gás de exaustão é controlada pela variação na vazão do material úmido que passa pelo secador rotativo. Algumas aproximações distantes da realidade industrial são assumidas: a temperatura do gás na saída da fornalha é constante e a vazão de combustível não é manipulada. A aplicação é feita apenas em simulador.

Ortega et al. (2007) analisaram a aplicação de um controle robusto H_∞ em um secador rotativo para areia úmida. O sistema é considerado multivariável, a temperatura do gás de exaustão e a umidade do material são controladas pela manipulação da vazão de combustível e da vazão de material úmido. O controle aplicado exige o conhecimento do modelo não linear da planta controlada.

As técnicas MPC não linear, GPC e PID são comparadas em (Pablo et al., 2016). Os sistemas de controle estudados são aplicados em uma planta piloto de secador rotativo para sementes de cacau. A temperatura do gás de saída do secador é controlada pela vazão de combustível GLP. O estudo indica um melhor desempenho para o MPC não linear, apesar da complexidade do projeto comparada às outras técnicas.

Grande parte das técnicas de controle existentes para secadores rotativos são de uma entrada e uma saída. Variáveis como pressão interna do secador e vazão de exaustão são negligenciadas. É difícil admitir que com tão poucas variáveis sendo monitoradas, o secador rotativo opere de fato em modo automático. Outro ponto negativo dessas técnicas é a necessidade de se conhecer o modelo do processo de secagem rotativa. As dificuldades de se levantar o modelo não linear desse sistema são descritas em (Wang et al., 2015). As propostas revisadas também se distanciam da realidade industrial ao exigirem sensores

de umidade online, ainda pouco encontrados no chão de fábrica por serem de alto custo e de difícil manutenção.

3. DESCRIÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM

O controle *fuzzy* foi desenvolvido e aplicado na unidade de produção de fertilizantes da empresa Yara no complexo industrial de Paulínia/SP. O diagrama esquemático da planta do secador rotativo é apresentado na Figura 1. O material a ser seco é alimentado em um tambor rotativo pelo material proveniente da etapa de granulação. O comprimento do tambor é de 24 metros e 3,5 metros de diâmetro. O ar de secagem é fornecido por um ventilador e é aquecido pela queima de gases em uma fornalha. A biomassa de cavaco de madeira é usada como combustível. O produto seco é enviado às etapas de resfriamento e peneiramento. A parcela desse produto na faixa entre 2 e 4 mm é enviada ao armazém de estoque e a outra parcela retorna ao processo.

Figura 1. Processo de secagem de fertilizantes.

O fertilizante na entrada do secador tem um teor de umidade entre 10 e 15%. O principal requisito do sistema é secar o fertilizante a um teor de umidade menor que 2,5%. O produto é seco para endurecer os grãos e evitar desintegração ou empedramento dos grânulos nos armazéns e embalagens.

A taxa de alimentação do fertilizante é controlada pelo operador. A velocidade de rotação e a inclinação do secador são fixas. O arraste gerado pelo gás quente em movimento varia em função da abertura da válvula do ar de exaustão, da quantidade de alimentação do produto e da própria temperatura do gás. A temperatura do gás varia em função das vazões de ar de combustão e biomassa, da proporção estequiométrica entre estas, do poder calorífico e da umidade da biomassa utilizada.

Não há um instrumento de medição de umidade online na planta. Essa limitação acontece em grande parte dos sistemas de secagem rotativa devido ao alto custo de compra e manutenção do instrumento de medição de umidade em tempo real. A umidade na saída do secador é inferida por meio da temperatura do gás de exaustão. Essa forma de inferência da umidade é prática comum na indústria e bem documentada em (Park et al., 2014) e (Moyers and Baldwin, 1997). Para a planta em estudo, uma temperatura do gás de exaustão acima de 95°C garante uma umidade abaixo de 2,5% no produto.

4. SISTEMA DE CONTROLE REGULATÓRIO

Existem três malhas de controle regulatório na planta. Na Figura 2, as malhas de controle são representadas pelos blocos TIC02, TIC03 e FIC01. As TIC02 e 03 controlam a temperatura na saída da fornalha, a primeira por meio da vazão de ar de combustão e a segunda por meio da vazão de biomassa. Já a FIC01 manipula a válvula de exaustão para controlar a vazão de ar entre o secador e a chaminé. O controlador PID é usado nas malhas TIC02 e FIC01, uma lógica baseada em regras é usada na malha TIC03.

Figura 2. Camada de controle regulatório na planta de secagem rotativa.

O objetivo da estratégia de controle nessa abordagem é manter o *setpoint* de temperatura na saída da fornalha fixo e igual a 1025°C. A taxa de alimentação de fertilizantes no secador e o *setpoint* da malha de vazão de ar de exaustão são modificadas ao longo do tempo pelo operador. O operador também monitora constantemente a temperatura do gás de exaustão para que esta seja igual a 95°C.

5. SISTEMA DE CONTROLE FUZZY PROPOSTO

Como apresentado em (Precup and Hellendoorn, 2011), o projeto e implementação de controle *fuzzy* têm sido bem aceitos em aplicações industriais. Duas razões se destacam: (i) não precisa de modelo do processo, que em alguns casos é bem complexo de se identificar e (ii) insere ao controlador de forma simples o conhecimento prévio dos responsáveis pela operação. Este último argumento é especialmente importante para o uso prolongado e manutenção do sistema de controle implantado, como pode ser visto em resultados de implantação de controle *fuzzy* em (Júnior et al., 2018) e (Magalhães and Euzébio, 2018).

A Figura 3 ilustra o diagrama de processo com a nova estratégia de controle. O controlador *fuzzy* manipula três variáveis do processo: o *setpoint* da malha de vazão de gás de exaustão, o *setpoint* da malha de vazão do ar de combustão e a vazão de biomassa que alimenta a fornalha. Quanto menor a vazão do gás de exaustão, maior o tempo de residência do gás quente no secador e, portanto, maior a troca de calor entre o ar quente e o fertilizante úmido. A razão estequiométrica é regulada com o passar do tempo de acordo com as variações no ar de combustão e na vazão mássica de biomassa na fornalha.

Figura 3. Controlador *fuzzy* e a interligação com o processo e o controle regulatório.

O principal objetivo do sistema de controle proposto é manter a temperatura do gás na saída do secador a mais próxima do valor ótimo estabelecido para o processo de secagem. Diferente da estratégia apenas com controle regulatório, a temperatura do gás na saída do secador passa a seguir um *setpoint*. Devido à sua importância na qualidade do produto final, esta é a única variável de processo a seguir um *setpoint*.

Foram criadas 19 regras de controle, listadas na Tabela 1, a partir da capacidade dos especialistas em informar verbalmente como a alterações das variáveis do processo influenciam na dinâmica do processo, e consequentemente, na qualidade do produto. As regras foram formuladas como a seguir:

SE entrada n for {baixa, média, alta}
E entrada m for {baixa, média, alta}
ENTÃO saída z é {muito baixa, baixa,
média, alta, muito alta}

Devido ao acoplamento entre as variáveis, foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais, já que estas apresentam transição mais suave entre os valores. As Figuras 4 e 5 ilustram as funções de pertinência para as seis entradas e para as três saídas, respectivamente.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O controlador *fuzzy* foi projetado no programa *FuzzyDesigner* da Rockwell Automation e está em operação em um dos SDCDs da planta de Granulação do Complexo Industrial da Paulínia, uma unidade de produção de fertilizantes da Yara.

A análise de desempenho do controlador *fuzzy* foi feita com base em um período de 16 horas. Durante esse período não houve intervenção dos operadores na camada de controle regulatório ou em qualquer outro atuador em campo. A Figura 6 apresenta a temperatura do ar na saída do secador e seu respectivo *setpoint*. Durante o período analisado houve uma máxima de 109°C e uma mínima de 78 °C.

Tabela 1. Regras do controlador *Fuzzy*.

Entradas <i>Fuzzy</i>							Saídas <i>Fuzzy</i>		
Nº	Temp. Fornalha	Temp. Secador	Vazão Ar Exaustão	Vazão Produto	Pressão Fornalha	SP Temp. Secador	Vazão Biomassa	Vazão Ar Combustão	Abertura Válvula Ar Exaustão
1			BAIXO	BAIXO	BAIXO			MÉDIO	
2			BAIXO	ALTO	BAIXO				ALTO
3			ALTO		BAIXO				ALTO
4			BAIXO	BAIXO	ALTO				BAIXO
5			BAIXO	ALTO	ALTO				MÉDIO
6			ALTO		ALTO				ALTO
7	MÉDIO	BAIXO		BAIXO		$\overline{\text{BAIXO}}$	MÉDIO	ALTO	
8	BAIXO	BAIXO		BAIXO		$\overline{\text{BAIXO}}$	ALTO	MUITO ALTO	
9	MÉDIO	BAIXO		ALTO		$\overline{\text{BAIXO}}$	ALTO	MUITO ALTO	
10	BAIXO	BAIXO		ALTO		$\overline{\text{BAIXO}}$	MUITO ALTO	MUITO ALTO	
11	ALTO	BAIXO		ALTO		$\overline{\text{BAIXO}}$	ALTO	MUITO ALTO	
12	BAIXO	MÉDIO		BAIXO		MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	
13	MÉDIO	MÉDIO		BAIXO		MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	
14	MÉDIO	MÉDIO		ALTO		MÉDIO	MÉDIO	ALTO	
15	ALTO	MÉDIO		ALTO		MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	
16	ALTO	ALTO		BAIXO		$\overline{\text{ALTO}}$	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	
17	MÉDIO	ALTO		BAIXO		MÉDIO	MUITO BAIXO	BAIXO	
18	MÉDIO	ALTO		ALTO		$\overline{\text{ALTO}}$	MUITO BAIXO	BAIXO	
19	ALTO	ALTO		ALTO		$\overline{\text{ALTO}}$	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO

Figura 4. Funções de pertinência para as entradas *fuzzy*

Figura 5. Funções de pertinência das saídas fuzzy

Figura 6. Temperatura na saída do secador com a estratégia de controle proposta.

O resultado obtido com o controle fuzzy é comparado com o resultado da estratégia anterior baseada nas decisões da operação. Foi utilizado um conjunto de dados correspondente a 16 horas de funcionamento da planta. A Figura 7 apresenta a análise estatística por *boxplot* da temperatura de saída do secador para as duas estratégias. São observadas uma mediana de 95,31°C para a estratégia com controle fuzzy e 90,58°C para a estratégia anterior.

A variabilidade da temperatura do secador aumentou com a estratégia de controle fuzzy, mas a mediana ficou mais próxima à temperatura ideal de 95°C.

Figura 7. *Boxplot* da temperatura na saída do secador com a operação do controle fuzzy e controle regulatório.

O desempenho do controlador fuzzy e do controle regulatório também foram avaliados por meio do índice de Harris (Desborough and Harris, 1992) e da integral do valor absoluto do erro (IAE), Tabela 2. A aplicação do controle fuzzy reduziu em 37% o IAE da temperatura da saída do secador em função da referência. A nova estratégia apresentou ainda uma melhora de 44% no índice de Harris.

Tabela 2. Índices de desempenho.

Índice	Controle Fuzzy	Controle Regulatório
IAE	76,62	120,71
Harris	0,13	0,09

Na estratégia de controle apenas com as malhas do regulatório, o *setpoint* de temperatura da fornalha era mantido fixo em 1025°C. A Figura 8 apresenta o valor da temperatura na saída da fornalha para a nova estratégia fuzzy. Para essa nova abordagem, a temperatura permaneceu mais de 85% do tempo abaixo de 1025°C.

Figura 8. Temperatura na saída da fornalha.

De acordo com o *boxplot* na Figura 9, a mediana da temperatura que era de 1.010,75°C com controle regulatório reduziu a uma mediana de 926,33°C com a estratégia fuzzy.

A menor temperatura na fornalha implica em um menor consumo de biomassa. É importante salientar que o menor consumo de biomassa não prejudicou a temperatura na saída do secador. A temperatura na saída do secador teve um aumento médio de 3,9°C.

Figura 9. *Boxplot* da temperatura na fornalha – Controle *fuzzy* e regulatório

Durante o período de testes das estratégias de controle, o consumo de biomassa caiu de 54,2 t para 49,3 t com o controle *fuzzy*. Essa redução de 9% de consumo de biomassa corresponde a uma economia anual de R\$486.000,00.

O material da biomassa contém cerca de 40% de carbono em peso, com o restante de hidrogênio (6,7%) e de oxigênio (53,3%). Dada uma estimativa de consumo de 18.000 t de biomassa por ano, a aplicação do controlador *fuzzy* pode obter a redução de 648 t por ano na emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. De acordo com Nowak et al. (2013), seria necessário 84.265 m² de área de floresta urbana para obter a mesma redução de dióxido de carbono na atmosfera.

A aplicação do controlador *fuzzy* também resultou em ganhos intangíveis. Durante o período de operação, os operadores não fizeram nenhuma alteração nas variáveis que o sistema *fuzzy* controlava. Dessa forma foi possível dedicar atenção a outras áreas da planta que eram monitoradas com menor frequência. Houve ainda grande satisfação dos operadores por verificar que o próprio conhecimento foi utilizado na elaboração das regras utilizadas no controlador.

7. CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um controlador *fuzzy* e aplicado ao processo de secagem rotativa em uma planta de produção de fertilizantes. As regras e funções de pertinência foram desenvolvidas com base no conhecimento dos especialistas do processo e embarcadas no SDCD existente. A aplicação do controle *fuzzy* tornou o processo de secagem automático e sem a interferência humana. A variável de maior interesse nesse sistema, a temperatura na saída do secador, obteve o valor médio de 94,2 °C para um *setpoint* de 95 °C durante o período de teste. Esse bom resultado para a qualidade do produto foi obtido com redução de 9% no consumo de biomassa e consequente redução da emissão de CO₂ para a atmosfera. Como trabalho futuro, pretende-se aprimorar

as funções de pertinência para reduzir a variabilidade no processo e estender o controlador para a operação de granulação do fertilizante.

REFERÊNCIAS

- Arruda, E., Façanha, J., Pires, L., Assis, A., and Barrozo, M. (2009). Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(9), 1414–1418.
- Delele, M.A., Weigler, F., and Mellmann, J. (2015). Advances in the application of a rotary dryer for drying of agricultural products: A review. *Drying technology*, 33(5), 541–558.
- Desborough, L. and Harris, T. (1992). Performance assessment measures for univariate feedback control. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70(6), 1186–1197.
- Didriksen, H. (2002). Model based predictive control of a rotary dryer. *Chemical Engineering Journal*, 86(1-2), 53–60.
- Júnior, Ê.L., Ferreira, A., Moreira, V., and Euzébio, T. (2018). Fuzzy fault tolerant controller applied in an iron ore concentrate dewatering plant. In *6th International Congress on Automation in Mining*. GECAMIN.
- Magalhães, S. and Euzébio, T. (2018). Supervisory fuzzy controller for thickener underflow solids concentration on a simulated platform. In *6th International Congress on Automation in Mining*. GECAMIN.
- Moyers, C.G. and Baldwin, G. (1997). Psychrometry, evaporative cooling, and solids drying. *Perry's chemical engineers' handbook*, 1–90.
- Mujumdar, A.S. (2014). *Handbook of industrial drying*. CRC press.
- Nowak, D.J., Greenfield, E.J., Hoehn, R.E., and Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the united states. *Environmental pollution*, 178, 229–236.
- Ortega, M., Castaño, F., Vargas, M., and Rubio, F. (2007). Multivariable robust control of a rotary dryer: Analysis and design. *Control Engineering Practice*, 15(4), 487–500.
- Pablo, P.R., William, I.A., José, M., and José, O. (2016). Predictive and adaptive nonlinear controller applied to a drying process of cocoa beans. In *2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 1–6. IEEE.
- Park, K.J.B., Park, K.J., Alonso, L.F.T., Cornejo, F.E.P., and Fabbro, I. (2014). Secagem: fundamentos e equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 16(1), 93–127.
- Precup, R.E. and Hellendoorn, H. (2011). A survey on industrial applications of fuzzy control. *Computers in industry*, 62(3), 213–226.
- Wang, X., Qin, B., Xu, H., and Zhu, W. (2015). Rotary drying process modeling and online compensation. *Control Engineering Practice*, 41, 38–46.
- Wu, Z., Hu, Y., Lee, D., Mujumdar, A., and Li, Z. (2010). Dewatering and drying in mineral processing industry: Potential for innovation. *Drying Technology*, 28(7), 834–842.
- Yliniemi, L., Koskinen, J., and Leiviskä, K. (1998). Advanced control of a rotary dryer. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(23), 119–124.