

# APLICAÇÃO DA LÓGICA NEBULOSA NO CONTROLE DA TEMPERATURA DE UMA CÂMARA CONVECTIVA FORÇADA PARA SECAGEM DE CERÂMICA.

**Duarte, J. C. C.**

**Belo, F. A. & Santos, C. A. C.\*\***

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 58051-970, João Pessoa, PB, Brasil. E-mail: [jcarlos@les.ufpb.br](mailto:jcarlos@les.ufpb.br)

## Resumo

Apresenta-se o controle de processo térmico de uma câmara de vazão forçada para secagem de produtos cerâmicos. O algoritmo nebuloso é acionado através de um micro computador em comunicação com um CLP (controlador lógico programável). As variáveis de entradas são a temperatura, a derivada temporal da temperatura e a vazão mássica. A variável de saída é a potência elétrica, obtida da seleção de um conjunto de resistências elétricas independentes e de diferentes potências. Descrevem-se o sistema, a lógica implementada e os resultados simulados, como parte de um sistema completo de uma câmara de secagem convectiva de potência térmica razoavelmente alta, da ordem de 10 kW.

**Palavras chave:** Lógica nebulosa, câmara convectiva, cerâmica

## 1. INTRODUÇÃO

A lógica nebulosa tem contribuído nos anos recentes para muitas aplicações na automação industrial, Altrock, 1999. O controle PID (proporcional, integral e derivativo) em um processo, trabalha em condições estáveis, e não possui bom desempenho quando acontece forte distúrbio ou parâmetros que variam com o tempo. O controle tradicional e os códigos computacionais são implementados em sistemas absolutos do tipo verdadeiro/falso, sim/não e liga/desliga. A lógica nebulosa emprega um modo mais humano de pensamento sobre um problema que usa descrição de multivalores do controlador e dos parâmetros controlados.

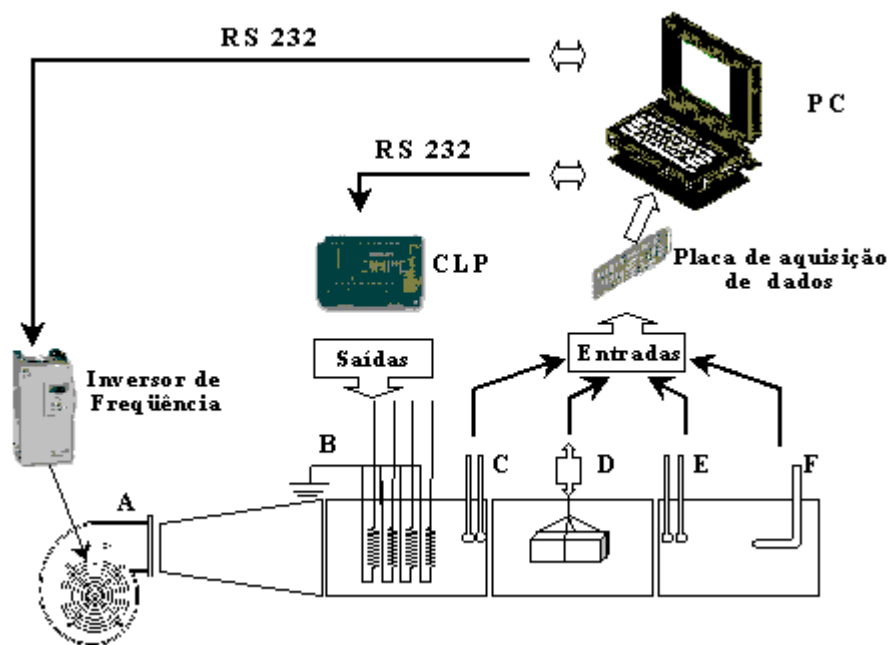
Diferente da lógica clássica, onde uma proposição é completamente verdadeira ou falsa, na lógica nebulosa uma proposição pode assumir um grande número de valores verdadeiros. Devido a poder assumir um grande número de valores verdadeiros, sua modelagem pode ser muito simples, permitindo o uso de modelos aproximados de engenharia. Isto faz com que o sistema nebuloso seja implementado em pouco tempo, levando a uma grande aplicação industrial, diferente das modelagens acadêmicas e/ou científicas que podem levar anos para serem resolvidas. É baseada na teoria dos conjuntos nebulosos e da lógica nebulosa, onde pode ser visto em Klir and Folger (1988), Lee, C.C., 1990.

O estudo da aplicação do controle nebuloso em um forno, um exemplo de controle térmico de convecção natural, é feito por Oliveira e Araújo, 1998. Um algoritmo de controle

PID, com sintonia automática de seus parâmetros para controle de processos térmicos de primeira ordem mais tempo morto é feita por Caon Jr. et all, 2000. Esse controle de temperatura é de baixa potência, da ordem de 70 W. No controle de temperatura com potências elevadas, maiores que 1kW, por exemplo, os blocos de trocadores de calor, juntamente com o fluido utilizado, possuem elevada capacitância térmica. Essas capacitâncias térmicas elevadas levam a grandes atrasos de respostas, dificultando a sintonia dos controladores PID tradicionais. Neste trabalho descreve-se um sistema de controle nebuloso de uma câmara de convecção forçada, e de potência térmica elevada, da ordem de 10 KW, com sua simulação feita através do MATLAB.

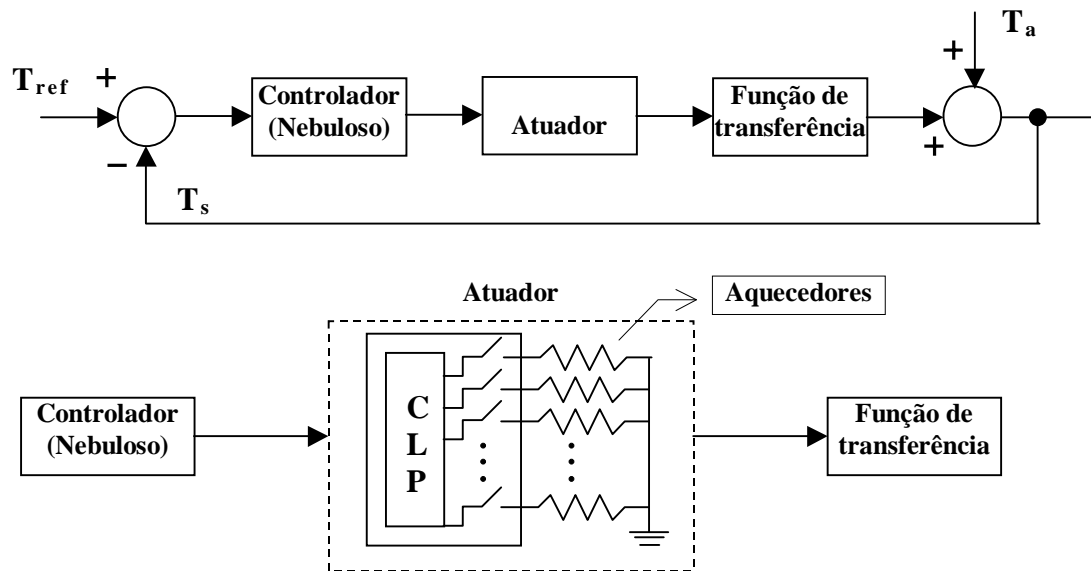
## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A figura 1 mostra o sistema convectivo implementado para secagem otimizada da cerâmica vermelha. Sua descrição detalhada é feita em Santos e Belo, 2000. Um computador (PC) utiliza duas portas seriais RS-232 para controlar a vazão mássica e a temperatura através do inversor de freqüência e do controlador lógico programável (CLP), respectivamente. A entrada da informação do sistema convectivo para o computador é feita através de uma placa de aquisição de dados, onde se têm as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido a montante da amostra(C) e a jusante da amostra (E), a medida da massa da amostra com o tempo (D) e a medida da vazão mássica pelo medidor deprimogênio (F). A lógica nebulosa é decida pelo computador que aciona os trocadores de calor (resistências elétricas B) através das saídas do CLP.



**Figura 1.** Desenho esquemático do secador.

A partir da figura 1, tem-se o diagrama do sistema de controle, dado na figura 2. A temperatura de referência  $T_{ref}$  é uma temperatura com o tempo pretendida (senóide, rampa ou degrau, por exemplo). No controlador está o conjunto das regras nebulosas para acionar o atuador. O atuador, o CLP, seleciona no tempo os diferentes contactores elétricos, ligados as resistências elétricas de diferentes potências. A função de transferência é determinada pelo modelo de engenharia do trocador de calor. A temperatura ambiente  $T_a$  é a temperatura de entrada dos gases na entrada da câmara e  $T_s$  é a temperatura na saída do trocador de calor.



**Figura 2.** Sistema de controle de temperatura da câmara

## 2.1 A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

O balanço de energia do volume de controle do sistema térmico é dado na figura 3. Admitem-se as hipóteses de perdas de calor para o ar em volta do sistema desprezível, que não há armazenamento de calor no material de isolamento e que o ar no reservatório dentro da superfície de controle esteja perfeitamente misturado de modo que a temperatura do fluido seja uniforme. Em regime permanente tem-se:

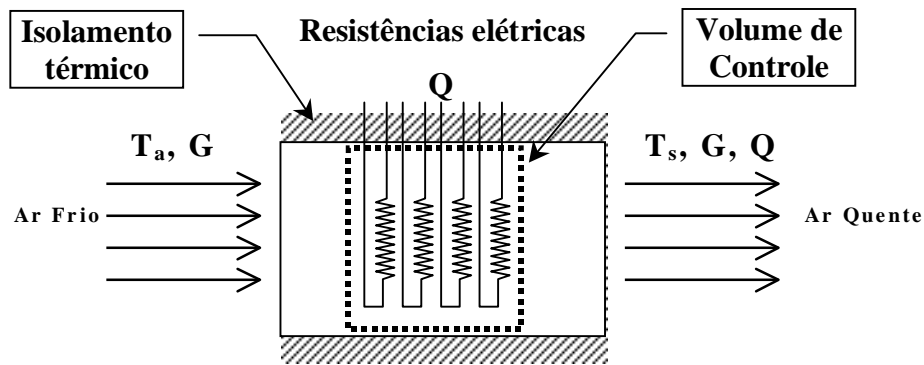
$$Pe = G c_{par} \Delta\Theta \quad (1)$$

Onde:  $Pe$  : potência elétrica fornecida pelas resistências (Watts),

$G$  : vazão mássica, kg/s

$c_{par}$  : Calor específico do ar, kcal/kg °C

$\Delta\Theta = T_s - T_a$  : variação da temperatura de saída e entrada do sistema, °C



**Figura 3.** Volume de controle do trocador de calor

A função de transferência é obtido de maneira semelhante a um modelo de engenharia de um sistema térmico, conforme Ogata, 1998. Suponha-se que a temperatura do ar a montante seja mantida constante e que a taxa de entrada de calor seja variada de  $H$  para  $Q + q_e$ , onde  $q_e$  representa uma pequena variação na taxa de entrada de calor fornecida pela resistência elétrica. A taxa de saída de calor na saída irá variar de  $Q$  até  $Q + q_s$ , e a temperatura do ar que sai também irá variar de  $\Delta\Theta$  até  $\Delta\Theta + \theta$ . A potência de saída ( $q_s$ ), capacitância e resistência térmica desse sistema são dadas por:

$$q_s = Gc_{par}\theta \quad (2)$$

$$R = \frac{\theta}{q_s} = \frac{1}{Gc_{par}} \quad (3)$$

$$C = M_{re}c_{pre} \quad (4)$$

Onde:  $M_{re}$ , é a massa da resistência elétricas máxima

$c_{pre}$  = Calor específico das resistências elétricas, kcal/kg °C

A equação diferencial para este sistema, no caso de regime transiente, é:

$$h_e = \frac{\theta}{R} + C \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

Aplicando Laplace, tem-se a função de transferência:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{Q_e(s)} = \frac{R}{1 + RCs} \quad (6)$$

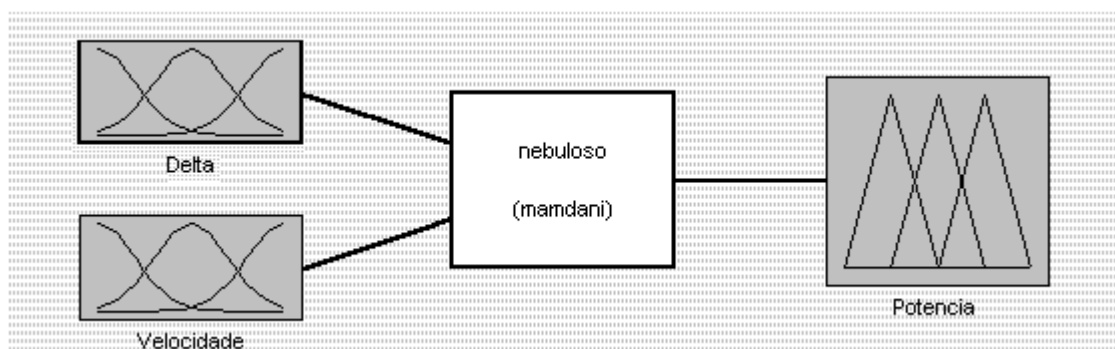
## 2.2 CONTROLE NEBULOSO

Pode-se dividir o problema em um número discreto de possíveis decisões, associando funções relacionais de lógica nebulosa com cada entrada e saída. A exatidão da saída depende de quantas funções relacionais se define, quantas regras se implementam e a qualidade das mesmas.

A aplicação de controle de temperatura consiste em regular a potência do trocador de calor de acordo com uma temperatura de referência. As entradas do sistema são a diferença entre a temperatura de referência e temperatura de saída do trocador de calor (delta) e a variação com o tempo dessa diferença de temperatura (velocidade). Isso é feito através do aquecimento ou resfriamento de diferentes resistores elétricos, até sua temperatura alcançar a temperatura de referência. Pode-se inicialmente representar o algoritmo do sistema tomando-se algumas ações básicas, como:

- SE a temperatura de saída está LONGE da temperatura de referência ENTÃO precisa-se selecionar grupos de GRANDE potência para aquecer o resistor,
- SE a temperatura de saída está PERTO da referência ENTÃO precisamos selecionar grupos de potência PEQUENA,
- SE a temperatura de saída é IGUAL à de referência ENTÃO não precisamos aplicar NENHUMA potência.

Usando-se a ferramenta “FUZZY” do “MATLAB” pode-se exibir a aplicação como mostrado na figura 4. As entradas e saídas do sistema são chamadas de variáveis linguísticas.



**Figura 4.** Variáveis linguísticas de entrada e saída do sistema de controle.

Os conjuntos de condições escolhidas para representarem as variáveis linguísticas são dadas pelas condições de potência [Pz, Pp, Pm, Pg, Pmg], delta [D-p, Dz, D+p, D+m, D+g e velocidade [V-g, V-p, Vz, V+p, V+g]. Os sub-índices significam: z = zero, p = pequeno, m = médio, g = grande, mg = muito grande, + = variação positiva e - = variação negativa.

### 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Após alguns ensaios das simulações, foram escolhidos os valores típicos, valores máximos e de mínimos para cada condição das variáveis linguísticas, conforme as tabelas 1,2 e 3.

**Tabela 1.** Valores de Potência

Condição	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Pz	0	0	0
Pp	-5	15	35
Pm	30	50	70
Pg	65	85	105
Pmg	100	100	100

**Tabela 2.** Valores de Delta ( $\Delta\Theta$ )

Condição	Valor mínimo	valor típico	Valor máximo
D-	<-1	-1	0
Dz	-0,5	-0	0,5
D+p	0,25	1	1,75
D+m	1,5	2	2,5
D+g	2	3	>3

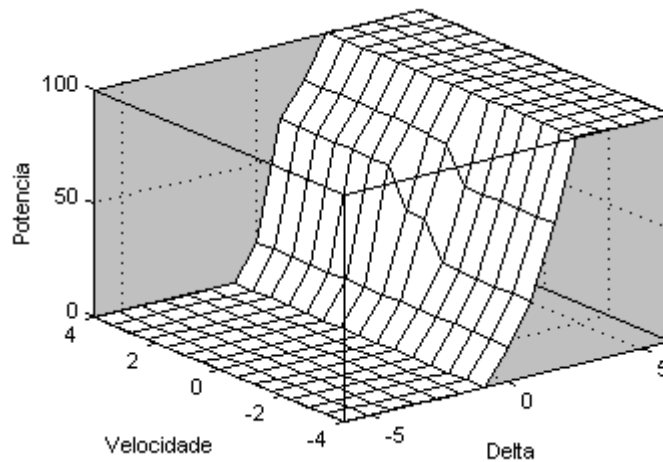
**Tabela 3.** Valores de Velocidade ( $d\Delta\Theta/dt$ )

Condição	Valor mínimo	valor típico	Valor máximo
V-g	<-1,5	-1,5	-0,5
V-p	-1	-0,5	0
Vz	-0,5	0	0,5
V+p	0	0,5	1
V+g	0,5	1,5	>1,5

Utilizando a tabela 4 como o conjunto de regras que determinam o valor da potência, através de delta e velocidade, tem-se a resposta da superfície de potência dada na figura 5.

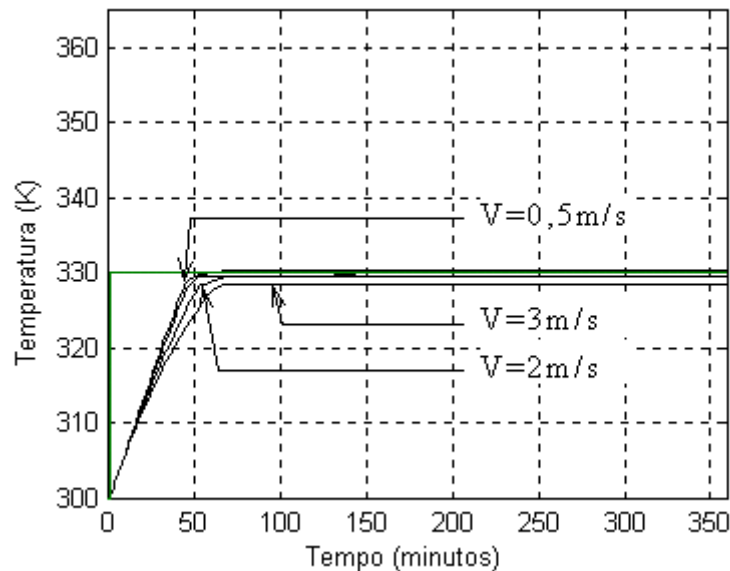
**Tabela 4.** Conjunto das regras

1. If (Delta is D-) then (Potencia is Pz) (1)
2. If (Delta is Dz) then (Potencia is Pp) (1)
3. If (Delta is D+p) then (Potencia is Pm) (1)
4. If (Delta is D+m) then (Potencia is Pg) (1)
5. If (Delta is D+g) then (Potencia is Pmg) (1)
6. If (Delta is D+p) and (Velocidade is V-g) then (Potencia is Pp) (1)
7. If (Delta is D+p) and (Velocidade is V-p) then (Potencia is Pm) (1)
8. If (Delta is D+p) and (Velocidade is V+p) then (Potencia is Pg) (1)
9. If (Delta is D+p) and (Velocidade is V+g) then (Potencia is Pmg) (1)
10. If (Delta is D+m) and (Velocidade is V-g) then (Potencia is Pm) (1)
11. If (Delta is D+m) and (Velocidade is V-p) then (Potencia is Pg) (1)
12. If (Delta is D+m) and (Velocidade is V+p) then (Potencia is Pmg) (1)
13. If (Delta is D+m) and (Velocidade is V+g) then (Potencia is Pmg) (1)

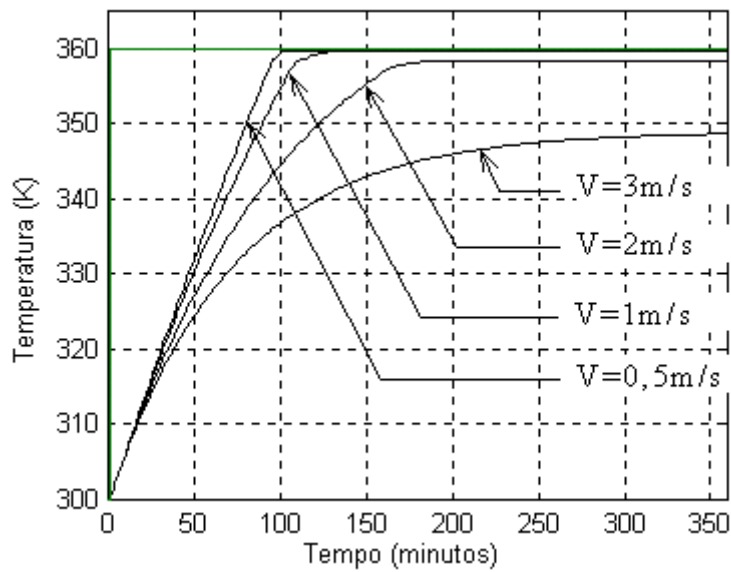


**Figura 5.** Superfície de potência em função de delta e velocidade

Para análise dinâmica, a vazão mássica do sistema utilizado variou em torno de  $G = 0,034 \text{ Kg/s}$  à  $0,101 \text{ Kg/s}$ , de acordo com os valores da câmara de secagem. A densidade e o calor específico do ar para as condições de trabalho são dadas por  $1,08 \text{ kg/m}^3$  e  $1,008 \text{ J/kg K}$  respectivamente, conforme Incropera, 1999. As figuras 6 e 7 mostram a resposta de dois degraus de amplitudes diferentes, para uma potência máxima de  $10 \text{ kW}$ . Devido a característica do algoritmo nebuloso, as respostas são diferentes, ao contrário do controle tradicional, onde se tem uma constante de tempo invariável. Da figura 7, tem-se que, para vazão do ar alta, da ordem de  $3 \text{ m/s}$ , não se conseguiria obter a temperatura de saída da ordem de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

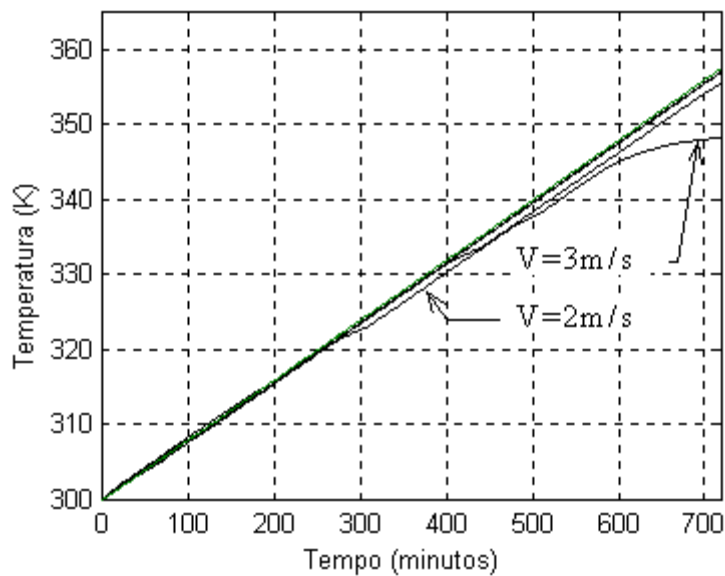


**Figura 6.** Resposta do sistema à um pequeno degrau de temperatura ( $P_e = 10 \text{ kW}$ ).



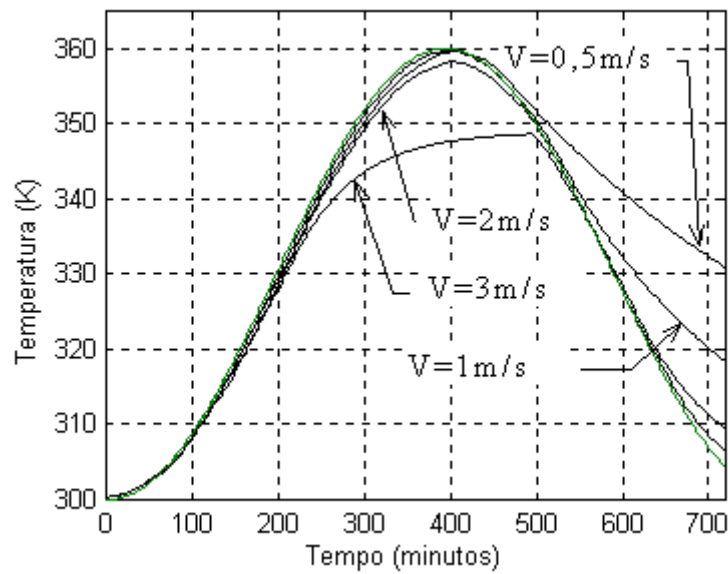
**Figura 7.** Resposta do sistema à um degrau maior de temperatura ( $P_e = 10 \text{ kW}$ ).

Na figura 8 e 9 têm-se a resposta a rampa e senóide para a mesma faixa de potência do exemplo anterior. Tal como o anterior, a medida que se cresce a velocidade, havia o deslocamento da função de referência da função de saída.



**Figura 8.** Resposta do sistema à rampa com inclinação 0,08 ( $P_e = 10 \text{ kW}$ ).

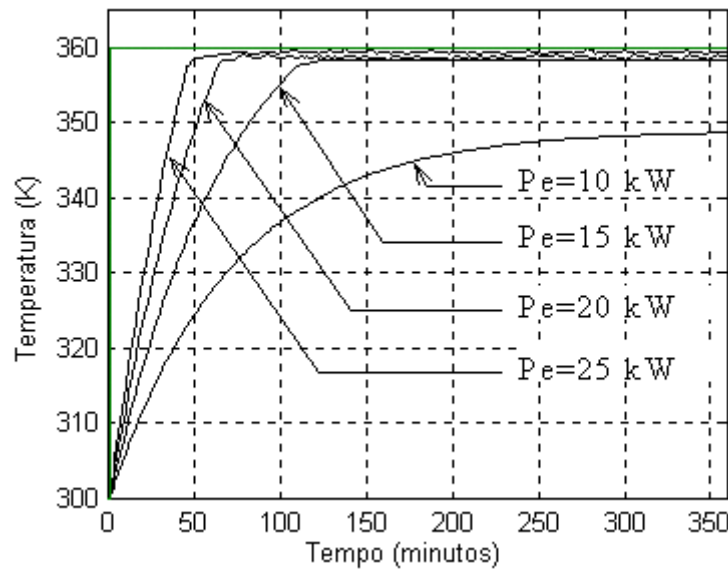




**Figura 9.** Resposta do sistema a uma entrada senoidal ( $P_e = 10 \text{ kW}$ ).

A figura 10 mostra as respostas à degrau para diferentes potências máximas, utilizando a velocidade de  $3 \text{ m/s}$ .

Foram comparados os resultados das simulações com medidas da câmara convectiva na secagem de produtos da cerâmica vermelha em diversos tipos de ensaios, ainda sem o CLP. Os resultados foram de encontro os resultados simulados.



**Figura 10.** Resposta à degrau do sistema com diferentes potências máximas ( $V = 3 \text{ m/s}$ ).

## 4.0 CONCLUSÃO

Foi elaborado um modelo simples de engenharia e escolhidas variáveis e regras nebulosas para o dimensionamento de um sistema de secagem de uma câmara de convecção forçada. Os diversos ensaios mostram como trabalhar com os parâmetros de projeto, ou como adequar potência elétrica máxima com a vazão e função resposta pretendida. A simulação implementada mostrou que o controle nebuloso teve um bom desempenho para potências elevadas, acima de 1kW, diferente dos controladores tradicionais, de acordo com a literatura consultada.

## 5.0 REFERÊNCIAS

- Altrock, C. V., Fuzzy logic merges with bang-bang, PID, InTech, An ISA Publication, May 1999.
- Caon Jr., J. R., Gesualdo, E., Oliveira, V. A., Implementação de controladores PID com sintonia automática por realimentação a relê para plantas térmicas, InTech Brasil, An ISA district 4 Publication, janeiro 2000.
- Incropera, F. P. e Witt, D. P., Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1992.
- Klir, G. J. and Folger, T. A., Fuzzy set, Uncertainty, and information, Prentice-Hall International, U.S.A.
- Lee, C. C., Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller Systems: Fuzzy Controller – Part II, IEEE Transactions on Systems, man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, 1990
- Ogata, Katsuhiko, Engenharia de Controle Moderno, Prentice-Hall do Brasil, 1998.
- Oliveira, M. C. e Araújo, E., O., Estudo da aplicação do controle nebuloso em fornos de calibração de termossensores.
- Santos, C. A. C., e Belo, F. A., Relatório Técnico do projeto “Desenvolvimento de Modelos e Protótipos de Secadores Convectivos Utilizados na Produção Otimizada da Cerâmica Vermelha”, Banco do Nordeste do Brasil, 2000.