

MODELAGEM FUZZY E SIMULAÇÃO DO CONTROLE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE REGENERADOR DE ALTO-FORNO SIDERÚRGICO¹

Thiago Arreguy Silva Vitorino²
Celso José Faria de Araujo³
Walmir Matos Caminhas⁴

Resumo

O modelo de um processo é de extrema importância para testar novas técnicas de controle. Sistemas fuzzy tem se mostrado uma poderosa ferramenta para modelar processos industriais complexos. O processo de combustão de um regenerador de alto-forno siderúrgico é um processo complexo, difícil de ser controlado eficientemente. Por meio de simulações, testa-se neste trabalho a eficiência de um controlador em tempo real baseado em casos e faz-se a comparação de seus resultados com um clássico controlador proporcional integral derivativo e com um controlador on-line neuro-fuzzy.

Palavras-chave: Modelagem Fuzzy; Controle da combustão; Alto-forno; Regenerador; Raciocínio baseado em casos.

FUZZY MODELLING AND SIMULATION OF THE COMBUSTION PROCESS CONTROL OF A BLAST FURNACE STEEL HOT STOVE

Abstract

The model of a process is extremely important to test new techniques of control. Fuzzy system has proven a powerful tool for modeling complex industrial processes. The process of combustion of a hot stove of blast furnace steel is a complex process, difficult to be controlled efficiently. By simulations, we have tests the effectiveness of a cased-based real time controller and the comparison of its results with a classic controller proportional integral derivative and with a on-line neuro-fuzzy controller.

Key words: Fuzzy modeling; Combustion control; Blast furnace; Hot-stove; Cased-base reasoning.

¹ Contribuição técnica ao 12º Seminário de Automação de Processos, 1 a 3 de outubro de 2008, Vitória, ES

² Mestrando em Engenharia Elétrica PPGEE - UFMG.

³ Doutorando em Engenharia Elétrica PPGEE - UFMG.

⁴ Professor Dr. do Departamento de Engenharia Elétrica - UFMG.

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é usado para produzir ferro gusa a partir de óxido de ferro, coque e fluxo de calor. A principal fonte de calor deste processo é o calor sensível vindo do ar pré-aquecido nos regeneradores, conhecido como ar de ventilação. Para garantir a eficiência de operação do alto-forno, a vazão e a temperatura do ar de ventilação devem ser mantidas. Infelizmente, esse objetivo não é fácil de ser atingido, pois o processo que envolve os regeneradores possui características de atraso de tempo, variante no tempo e não linearidade. Estratégias de controle tradicionais tal como PID não obtém sucesso no controle de combustão do regenerador, porque não existe modelo matemático preciso que descreve as características deste processo, apesar de se encontrar alguns modelos na literatura.⁽¹⁾ Entretanto alguns grupos de pesquisas têm proposto estratégias de controles avançadas como solução para resolver o problema de combustão do regenerador, tais como controle fuzzy⁽²⁾ e sistema especialista para controle.⁽³⁾ Mas a natureza destes controles inteligentes é baseada em regras, cujo obstáculo é obter o conhecimento do especialista, que é a base para a viabilidade destas estratégias de controle. Uma nova estratégia de controle proposta,⁽⁴⁾ que utiliza RBC (Raciocínio Baseado em Casos) como máquina de raciocínio para obter decisões de controle, mostrou-se eficiente e de fácil implementação para este tipo de problema de controle. Assim pretende-se construir um simulador do processo de controle de combustão dos regeneradores, no qual rede fuzzy será usada para modelar o processo, que será testado com três controladores diferentes: um controlador clássico PID, um controlador fuzzy ONFC⁽⁵⁾ e o controlador baseado em casos CTRBC.⁽⁴⁾

Este artigo é estruturado da seguinte maneira. A seção 1 é uma introdução. A seção 2 apresenta uma breve descrição sobre a implementação de controladores PID, ONFC, e CTRBC e suas arquiteturas. A seção 3 é uma breve descrição do regenerador e seu processo. A seção 4 descreve a metodologia utilizada para modelagem do processo e construção do simulador. A seção 5 apresenta os resultados e a seção 6 encerra com a conclusão.

2 IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES

2.1 Controlador PID

A equação de um controlador PID clássico é dada pela Equação 1,⁽⁶⁾ na qual K é a constante proporcional, T_i o tempo integrativo e T_d o tempo derivativo. Estes parâmetros podem ser projetados por métodos de sintonia, mas para isso é necessário um modelo matemático preciso da planta. Para a discretização da Equação 1 pode-se utilizar a aproximação de Tustin,⁽⁷⁾ também conhecida como transformação bilinear, que é equivalente a uma integração numérica, conhecida como método dos trapézios.

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad \text{Equação 1}$$

2.1 Controlador ONFC

O On-line Neurofuzzy Controller (ONFC) é um controlador inteligente (adaptativo), que tem como base o neurônio nebuloso NFN (Neo Fuzzy Neuron).^(8,9)

O processo de aprendizado do NFN consiste no ajuste dos seus parâmetros livres, sendo mantidos fixos os parâmetros das funções de pertinência de cada entrada. Considerando funções de pertinências complementares, os valores das funções de pertinência são diferentes de zero para, no máximo, duas funções vizinhas. Isto equivale a dizer que, para cada valor da variável de entrada e_i , ativa no máximo duas regras. Como as funções de pertinência são complementares, a soma de duas funções sucessivas é sempre igual a unidade. Portanto, tem-se a expressão dada pela Equação 2. O ajuste dos pesos desta estrutura tem como base o método do gradiente, sendo este processo representado pela Equação 3, no qual α é o passo deste algoritmo, determinante para sua convergência.

$$f_i(e_i) = u_1(e_i)w_1 + u_2(e_i)w_2 \quad \text{Equação 2}$$

$$w_i^k = w_i^{k+1} + \alpha e u_i \quad i = 1, 2 \quad \text{Equação 3}$$

Uma importante característica apresentada por este controlador é a simplicidade de sua estrutura, composta apenas por uma entrada e uma saída, associadas por duas regras nebulosas. Nesta estrutura neuro-fuzzy, duas funções de pertinência estão ativas em todo o processo de controle, desde que a entrada da mesma (o erro no caso) não ultrapasse o limite mínimo e máximo definidos para o domínio desta. Fora destes limites, apenas uma função permanece ativa, isto é, terá um valor não nulo. Em relação às correções dos pesos do controlador, é importante destacar que a cada interação os valores de w_1 e w_2 são reajustados, com o objetivo de minimizar o erro do sistema de controle.

2.3 Controlador RBC

O Raciocínio Baseado em Casos (RBC) é uma poderosa metodologia, cujo potencial pode ser verificado em diferentes aplicações industriais ^(3,10), que compara o problema presente com um anterior e aplica uma solução do passado ao problema presente. Em outras palavras, pode-se reutilizar a técnica de resolução de problemas que foi usada no passado e aplicá-la a um problema presente. Um ciclo típico do RBC é mostrado na Figura 1.

Um Controlador em Tempo Real Baseado em Casos (CTRBC) é definido como um controle em tempo real que emprega a metodologia de raciocínio baseado em casos para tomar decisões de controle. A arquitetura é muito similar a de um controlador especialista. A principal diferença entre eles está no método de raciocínio. Decisões de controle no CTRBC são tomadas com base no RBC e decisões de controle de sistemas especialistas são baseadas em raciocínio baseado em regras. Uma arquitetura típica de um sistema de controle usando CTRBC é ilustrada na Figura 2.

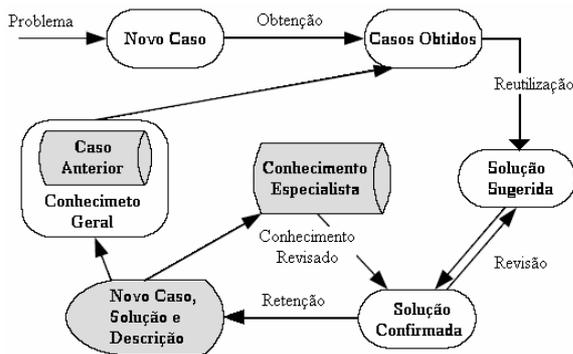


Figura 1. Ciclo do RBC.

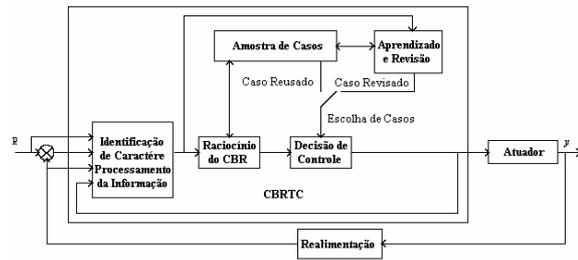


Figura 2. Arquitetura de um sistema de controle com CTRBC.

O conjunto de características obtidas após a identificação de caractere e processamento da informação baseados na medida dos parâmetros do processo é chamada de nova consulta (ou descrição do problema). Esta nova consulta é então submetida ao algoritmo do RBC, que é a parte básica do CTRBC. A decisão de controle feita pelo CTRBC tem dois resultados possíveis: se o algoritmo do RBC encontra um caso armazenado similar a nova consulta do caso amostrado, então a descrição da solução correspondente do caso similar, isto é, a decisão de controle em outras palavras, é reutilizada, resultando na descrição do efeito e na saída do atuador; se o algoritmo do RBC não encontra caso similar na base de casos, as funções de aprendizado de revisão serão executadas. Elas geralmente fazem uma tentativa de solução a este novo problema, que corresponde a menor unidade de ajuste do atuador. Após a atuação desta tentativa de decisão de controle, o ajuste do resultado será medido e avaliado, logo uma nova amostra de caso com todos os três elementos básicos, <problema, solução, efeito>, serão formados e adicionados a amostra de base de casos.

3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A fabricação do ferro gusa em um alto-forno requer uma grande vazão de ar pré-aquecido a altas temperaturas (por volta de 1.000°C). Um conjunto de 3 a 4 regeneradores operam ciclicamente no processo. Um regenerador possui um formato cilíndrico, altura elevada e interiormente é revestido de tijolos refratários, com a capacidade de acumular calor e depois liberá-lo. A geometria e as propriedades dos tijolos variam conforme as secções por altura, pois a seção mais alta opera a uma temperatura maior que a seção mais baixa. Durante a primeira parte do ciclo de trabalho, denominada combustão, os tijolos refratários são aquecidos através da queima do gás misto (GM), composto de gás de alto-forno (GAF) enriquecido com gás de coqueria (GCO), juntamente com ar de combustão. Os gases provenientes da queima saem para a chaminé. A Figura 3(a) ilustra este processo. Quando a temperatura do domo estabilizar em torno de 1.330°C e a temperatura da chaminé atingir o valor de 300°C tem-se o término do processo de combustão e inicia-se o processo de ventilação, no qual o ar comprimido circula no regenerador em sentido contrário, ver Figura 3(b). Durante esta operação de ventilação, uma válvula controla a temperatura do ar quente soprado através da vazão do ar soprado. Este alimenta o alto-forno durante todo o tempo de operação de ventilação. Em um determinado momento o próximo regenerador é posto em operação de ventilação e um novo ciclo é repetido, aproximadamente a cada 180 minutos. Tipicamente o ciclo de combustão de um regenerador de tamanho pequeno ou médio, dura 115 minutos e a ventilação dura 55 minutos. A transição entre as

operações, chamada de Equalização, requer alguns minutos, necessários para a troca de válvulas e pressurização do regenerador.

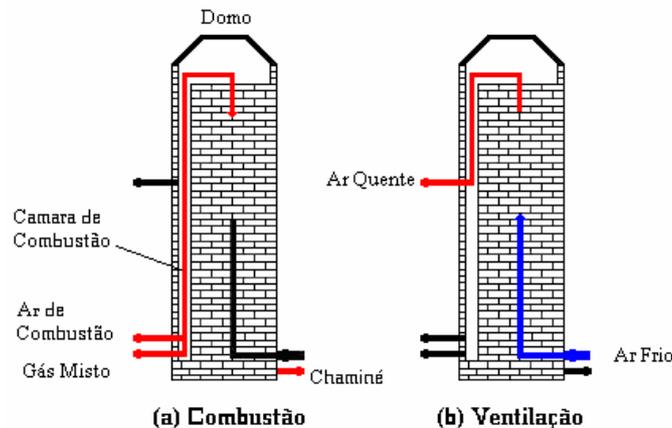


Figura 3. Duas fases de trabalho dos regeneradores.

Este estudo é baseado em dados do alto-forno #1 da Gerdau Açominas, localizado na cidade de Ouro-Branco MG. Este alto-forno opera num sistema com três regeneradores, no qual dois regeneradores operam em ciclo de combustão e o outro opera em ciclo de ventilação num dado instante de tempo.

Pelo fato do nível de calor de um regenerador não poder ser diretamente e simplesmente medido, o controle automático utiliza indiretamente dois parâmetros como variáveis controladas, que são a temperatura do domo e temperatura da chaminé. As variáveis manipuladas são as vazões de ar de combustão e de gás de alto-forno. Uma proporção adequada destas variáveis deve ser mantida para garantir a combustão completa do gás de alto-forno que maximizará a energia gerada durante a combustão. A fase de combustão pode ser dividida em dois estágios: o aquecimento rápido e o armazenamento de calor. Conseqüentemente o objetivo de controle é dividido e dois estágios diferentes, conforme esclarecido abaixo:

- i. Durante o estágio de aquecimento rápido, a temperatura do domo é elevada ao seu valor de estado estacionário tão rápido como possível, sem se importar com a mudança da temperatura da chaminé.
- ii. Durante a fase de armazenagem de calor, mantendo a temperatura do domo em torno do seu valor de estado-estacionário, e mantendo uma taxa ar/gás para minimizar o gasto de energia, a temperatura da chaminé é elevada até alcançar o limite superior desejado no final da combustão.

4 METODOLOGIA DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

4.1 Modelagem

Para o modelo fuzzy do processo de combustão dos regeneradores, inicialmente pensou-se em construir um modelo, cuja representação por diagrama de blocos pode ser visualizada na Figura 4(a). Este modelo é composto de quatro sub-modelos, conforme descrito abaixo:

- i. modelo da vazão de gás misto (VGM): as entradas deste modelo são a abertura da válvula de gás misto (av_{gm} , em %), a pressão da gás de alto-forno (p_{gaf} , Kg/m^2) e a saída é a vazão de gás misto (v_{gm} , em Nm^3/H);
- ii. modelo da vazão de ar de combustão (VAC): a entrada deste modelo é a abertura da válvula de ar de combustão (av_{ac} , em %) e a saída é a vazão de ar de combustão (vac , em Nm^3/H);

- iii. modelo da temperatura do domo (TD): as entradas deste modelo são as saídas dos modelos 1 e 2, ou seja, as vazões de gás misto e vazão de ar de combustão, e a saída é a temperatura do domo (t_d , em °C);
- iv. modelo da temperatura da chaminé (TC): as entradas deste modelo são as saídas dos modelos 1 e 2, ou seja, as vazões de gás misto e de ar de combustão, e a saída é a temperatura da chaminé (t_c , em °C);

Ao se tentar aproximar uma rede Neo Fuzzy Neuron (NFN)⁽⁹⁾ para os sub-modelos mostrado na Figura 4(a), com o método do gradiente para a minimização do erro quadrático médio durante o treinamento, não se obteve modelos satisfatórios, em termos do erro de validação. Na tentativa de melhorar este modelo, fez-se uma análise de correlação entre as variáveis de entrada e saída e uma análise de auto-correlação para as variáveis de saída, para identificar novas entradas, atrasadas no tempo, as quais possibilitariam um menor erro de validação. A intensidade das correlações obtidas para atrasos muito pequenos foram próximas. Decidiu-se assim, considerar o atraso de uma unidade de tempo para todos os sub-modelos, cujo modelo de diagrama de blocos correspondente está exemplificado na Figura 4(b), no qual realimentações das saídas foram inseridas.

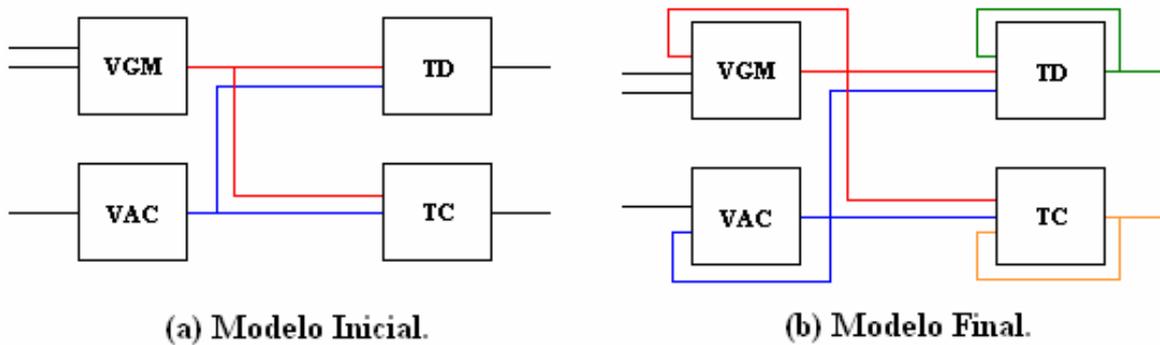


Figura 4. Diagrama de blocos do modelo de combustão.

As correspondentes equações discretas destes sub-modelos são as Equações 4, 5, 6 e 7, nas quais f representa a o somatório do produto do peso pelo valor da pertinência para cada partição da referida entrada para o modelo de rede do NFN.

$$T_d[k] = f(T_d[k - 1]) + f(vgm[k]) + f(vgm[k - 1]) + f(vac[k]) + f(vac[k - 1]) \quad \text{Equação 4}$$

$$T_c[k] = f(T_c[k - 1]) + f(vgm[k]) + f(vgm[k - 1]) + f(vac[k]) + f(vac[k - 1]) \quad \text{Equação 5}$$

$$vgm[k] = f(vgm[k - 1]) + f(avgm[k]) + f(avgm[k - 1]) + f(pgaf[k]) + f(pgaf[k - 1]) \quad \text{Equação 6}$$

$$vac[k] = f(vac[k - 1]) + f(avac[k]) + f(avac[k - 1]) \quad \text{Equação 7}$$

Os modelos de rede NFN obtidos, fazendo consideração do atraso de tempo para as entradas, com seis partições por entrada e com 100 épocas de treinamento para o método do gradiente visando a minimização do erro quadrático médio, foram melhores que os obtidos anteriormente, mas ainda deixando a desejar em termos do

erro de validação. Na tentativa de obter-se modelos mais precisos, o treinamento da rede NFN com seis partições foi feito pelo método dos mínimos quadrados. Os erros percentuais médios obtidos na validação foram bem inferiores aos obtidos no método do gradiente.

Como o tempo gasto no treinamento utilizando o método dos mínimos quadrados é bem inferior ao tempo gasto com o método do gradiente, resolveu-se investigar o uso de mais atrasos no tempo para as entradas e saídas. Para isto, variou-se o número de atrasos utilizados e verificou-se o respectivo erro percentual de validação, chegando à conclusão que na maioria dos casos o erro aumentava e apenas em alguns casos o erro diminuía de valores insignificantes, que não justificavam a complexidade do modelo utilizado (número de atrasos por variável). Desta forma prevaleceu o modelo de rede NFN com seis partições, atraso de tempo de uma unidade e o método dos mínimos quadrados no treinamento.

4.2 Simulação PID

Para a simulação do controle da combustão em malha fechada para um PID, no qual as variáveis manipuladas são **pgaf**, **avac** e **avgm** e as variáveis controladas são **tc** e **td**, conforme definido no modelo da Figura 4(b), simplificou-se o sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output), para um sistema SISO (Single Input Single Output), no qual a variável manipulada e a variável controlada são **avgm** e **td**, respectivamente. Nesta simplificação, as entradas **pgaf** e **avac** são calculadas em função da **avgm**, para manter a proporção necessária para a queima completa na combustão. Assim os parâmetros do PID foram calculados pela tentativa e erro, de forma que o tempo de subida do sistema em malha fechada fosse o mais rápido possível e não houvesse sobressinal. Os parâmetros do controlador sintonizado foram: $K = 0,35$ $T_i = 40$ $T_d = 10$. A taxa de amostragem adotada foi a mesma taxa de amostragem dos dados utilizados na construção do modelo fuzzy no item 4.1, ou seja, 10 segundos.

1.3 Simulação ONFC

A simulação do controle da combustão para o ONFC seguiu a mesma metodologia da simulação feita com o controlador PID. O passo de aprendizado α para o ajuste dos pesos do controlador foi definido como 0,3.

1.4 Simulação CTRBC

Como explicado anteriormente, o controle de combustão dos regeneradores pode ser dividido em dois problemas de controle: controle da temperatura do domo e controle da temperatura da chaminé. Durante o estágio de aquecimento rápido, uma taxa de incremento definida é o alvo do controle. Durante a fase de armazenamento de energia, um valor estável da temperatura do domo e uma taxa de incremento definida da temperatura da chaminé devem ser garantidas ao mesmo tempo. Conseqüentemente o CTRBC deve ser construído para alcançar estas três diferentes tarefas de controle. As variáveis manipuladas do CTRBC são **avgm** e **avac**. A seguir descreve-se mais detalhadamente o CTRBC que executa estas tarefas de controle.

Um CTRBC deve fazer a busca, o reuso e a revisão tão rápido quanto possível por causa do requerimento em tempo real. Conseqüentemente alguns cálculos mais complicados são incompatíveis com este tipo de aplicação. Entretanto o simples algoritmo dos k-vizinhos mais próximos é utilizado para fazer a busca e a equiparação dos casos similares pela distância euclidiana ponderada. A idéia

essencial deste algoritmo, utilizado por exemplo para o reconhecimento de padrões, é definir uma distancia espacial entre o caso de busca para ser equiparado com a base de casos, sendo a distancia utilizada como medida do grau de similaridade.

Finalmente a representação do caso do CTRBC para o controle do processo de combustão é determinado e descrito no Quadro 1.

A operação on-line do CTRBC pode ser explicada como se segue:

- i. A cada tempo de amostragem, meça ou calcule cada variável do processo listada na Tabela 1, e coloque-as num vetor da seguinte forma: $(t, T_d, \Delta T_d, T_c, \Delta T_c, P_{gaf}, V_{gaf}, V_{ac}, R_{gaf-ac}, A_{gaf}, A_{ac})$.
- ii. Compare a temperatura do domo corrente com valor do set-point, se a diferença é maior que um limite ϵ , então o CTRBC será ativado.
- iii. Pegue as variáveis correntes do processo como uma nova consulta e submeta-a ao algoritmo de raciocínio para procurar uma resposta.
- iv. O CTRBC irá checar nas suas memórias, ou seja, a base de casos, para ver se existe um caso similar.
- v. Se um caso similar é encontrado, então pegue a solução de descrição deste caso como resposta a consulta submetida: (A_{gaf}, A_{ac})

Se um caso similar não é encontrado, o CTRBC dará uma resposta, que será a mínima variação possível nas variáveis manipuladas (2% no caso), como resposta de tentativa de ajuste, cujo efeito será avaliado posteriormente.

Quadro 1. Representação do Caso.

Nome	Símbolo
Tempo de Combustão	t
Temperatura do Domo	T_d
Varição da Temperatura do Domo	ΔT_d
Temperatura da Chaminé	T_c
Varição da Temperatura da Chaminé	ΔT_c
Pressão do Gás de Alto-Forno	P_{gaf}
Vazão de Gás de Alto-Forno	V_{gaf}
Vazão de Ar de Combustão	V_{ac}
Razão Gás de Alto-Forno / Ar de Combustão	R_{gaf-ac}
Abertura da Válvula de Gás de Alto-Forno	A_{gaf}
Abertura da Válvula de Ar de Combustão	A_{ac}

5 RESULTADOS

Nas Figuras 5, 6, 7, 8 e 9, podem-se visualizar os resultados das simulações realizadas comparados com dados reais do processo, das variáveis envolvidas no processo de combustão de um regenerador: temperatura do domo, temperatura da chaminé, vazão de gás misto, vazão de ar de combustão e pressão do gás de alto-forno.

As curvas em azul, verde escuro, vermelho e verde claro correspondem à simulação do controlador PID, ONFC, CTRBC e curva real, respectivamente. Em alguns casos a curva do PID (azul) corresponde exatamente a curva do ONFC (verde escuro). A duração do ciclo de cada simulação foi de 321, 321, 392 e 416 amostras. Cada amostra corresponde a 10 segundos.

A vazão do gás de coqueria, que corresponde a aproximadamente a 7% do volume de gás misto foi de $5,46\text{Km}^3$, $5,46\text{Km}^3$, $5,69\text{Km}^3$ e $6,31\text{Km}^3$, respectivamente, para o PID, ONFC, CTRBC e Real. A economia deste gás no processo de combustão de um regenerador é um bom indicativo da eficiência da ação de controle.

É importante ressaltar que nas simulações realizadas, uma vez estabilizado o controle da temperatura do domo, o processo manteve-se estável até o final da simulação, pois perturbações, que são muito comuns no processo de combustão de regeneradores, como por exemplo, a entrada ou saída de um regenerador de combustão (já que sempre dois estão em combustão ao mesmo tempo), não foram incluídas nas simulações realizadas.

Comparando as simulações com os dados do processo, percebe-se que, a que mais se aproximou deste, foi a curva do controlador CTRBC. As simulações realizadas com os controladores PID e ONFC se mostraram as mais eficientes, fato este creditado a simplificação feita no sistema de controle (de MIMO para SISO), que não traduz fielmente a realidade do processo.

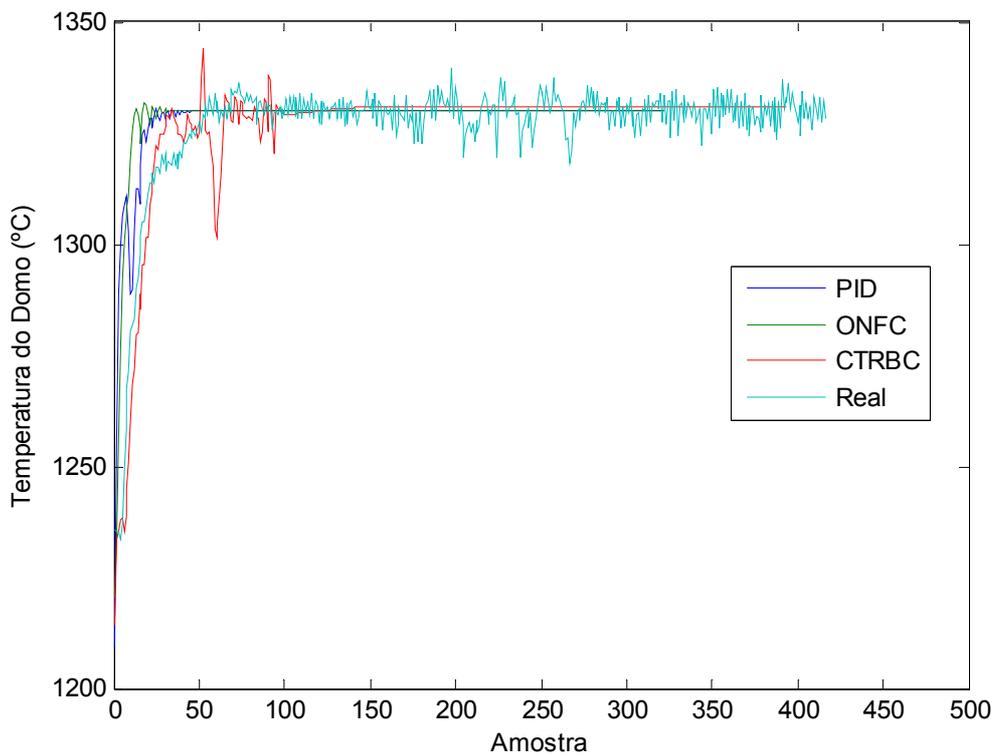


Figura 5. Temperatura do Domo.

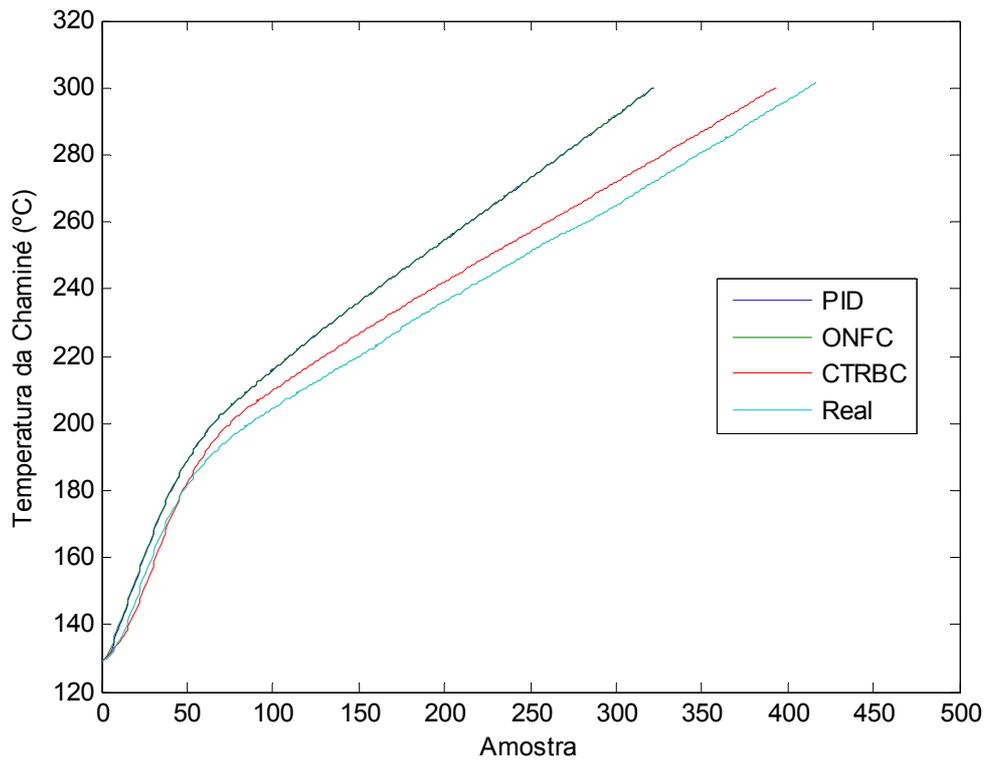


Figura 6. Temperatura da Chaminé.

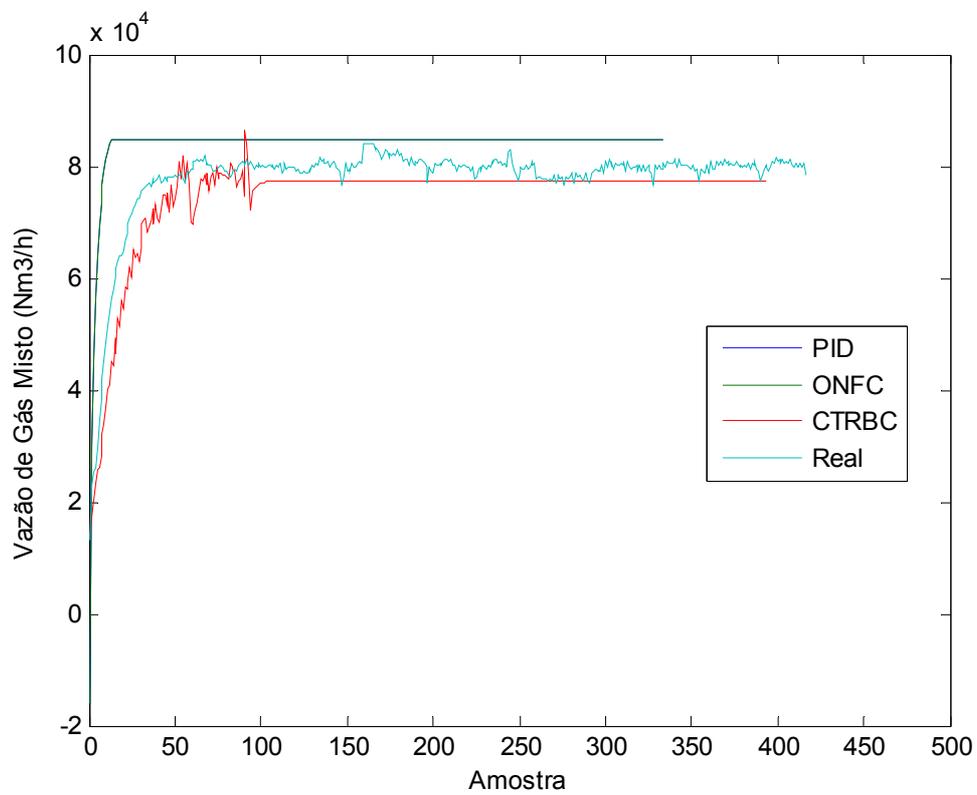


Figura 7. Vazão de Gás Misto.

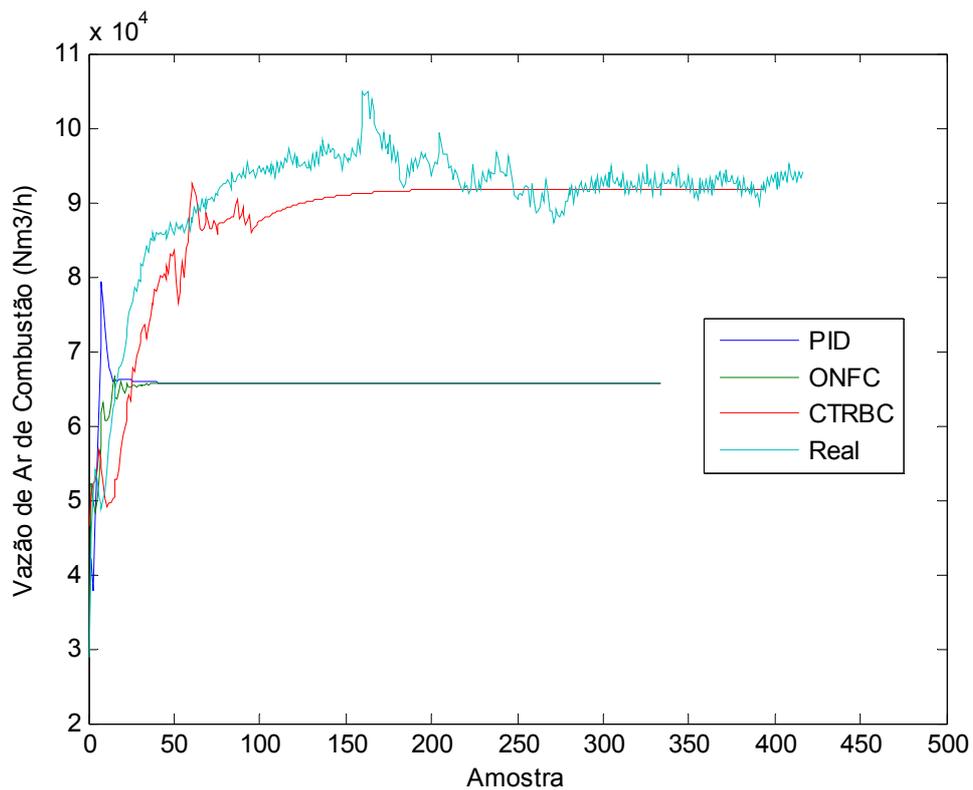


Figura 8. Vazão do Ar de Combustão.

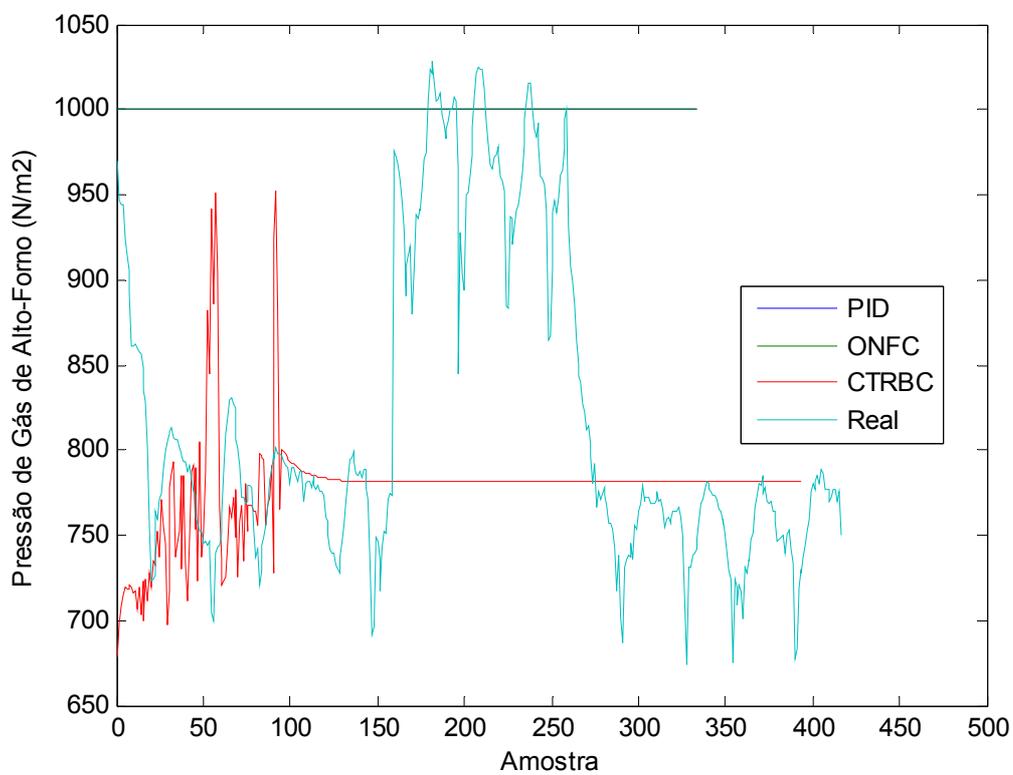


Figura 9. Pressão do Gás de Alto-Forno.

6 CONCLUSÃO

A modelagem fuzzy do processo proposta conseguiu representar o processo de combustão do regenerador de forma satisfatória. O controlador CTRBC, comparado com outras estratégias de controle, é fácil de ser implementado. Como base deste controlador, foram as amostras de casos montadas a partir das decisões de controle em operação manual, que leva em conta as experiências práticas tomadas por operadores e considerando que as decisões tomadas por estes foram fuzzy em alguns graus, pode-se dizer que as decisões de controle do CTRBC são implicitamente fuzzy. O CTRBC é uma ferramenta poderosa para lidar com problemas de controle de processos industriais complicados, como por exemplo, o controle da combustão dos regeneradores. Desta forma, as simulações realizadas, indicam que o CTRBC é uma boa estratégia de controle para o controle da combustão do regenerador, cuja validação será feita no processo do alto-forno.

REFERÊNCIAS

- 1 MUSKE, K.R.; HANSON, G.A.; HOWSE, J.W.; CAGLIOSTRO, D.J.; CHAUBAL, P.C., **Blast furnace stove control**, American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998 , vol.6, no., pp.3809-3810 vol.6, 21-26 Jun 1998
- 2 ZHUWU, M.; SHENGQIANG, L.; GANG L.; **The Intelligence Burning Control of the Hot Stove of Lianyuan Iron & Steel Group Co.**, Metallurgical Automation, no. 4, 2002, pp. 11-15
- 3 BERGMANN, R.; BREEN, S.; GOKER, M.; **Developing Industrial Case-Based Reasoning Applications**, The INRECA-Methodology, LNAI 1612, Springer, 1999.
- 4 JINSHENG, S.; JINCHUAN, Y.; RU M.; JINGTAO, Y., **Case-Based Real-Time Controller and its Application in Combustion Control of Hot Blast Stoves**, Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on , vol.2, no., pp. 7792-7796, 21-23 June 2006
- 5 GOUVÊA, M. R.; FIGUEIREDO, E. S.; MENEZES, B. R.; PARMA, G. G.; CAMINHAS, W. M. **Um Novo Controlador Neurofuzzy Baseado na Neo Fuzzy Network**, Congresso Brasileiro de Redes Neurais, 2005, Natal/RN. Anais do VII Congresso Brasileiro de Redes Neurais, 2005. v. 1. p. 1-6.
- 6 ASTROM, B.; Hagglund, T.; **PID Controllers: Theory Design and Tuning**. Ed. ISA, 1995
- 7 CHEN C. T.; **Linear System Theory and Design**, 3 edn, Oxford University Press, 1999
- 8 JANG, J. S. R.; C. T. SUN, E. MIZUTANI., **Neurofuzzy and Soft Computing**. Prentice Hall, 1997.
- 9 YAMAKWA, T.; UCHINO, E.; MIKI, T.; KUSANAGI, T.; **A Neo Fuzzy Neuron and its Applications to System Identification and Predictions to System Behavior**, Proceedings of the 2nd IIZUKA, Japan, 1992, pp. 477-483.
- 10 AAMODT, A.; PLAZA, E.; **Cased-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations and System Approaches**, AI communications, 7(1), 39-59, 1996