

## MODELAGEM E CONTROLE DE FORNOS CONTÍNUOS DE REAQUECIMENTO DE TIRAS DE BOBINAS DE AÇO

FILIPPE A. T. SILVEIRA\*<sup>†</sup> GUILHERME V. RAFFO\*<sup>‡</sup>

\**Graduate Program in Electrical Engineering - Federal University of Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil*

<sup>†</sup>*PAI - Gerência de Automação e Otimização de Processos - Aperam South America  
Praça Primeiro de Maio, 35180-000, Timóteo, MG, Brazil*

<sup>‡</sup>*Department of Electronic Engineering - Federal University of Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil*

Email: [filipeandersonn@gmail.com](mailto:filipeandersonn@gmail.com), [raffo@ufmg.br](mailto:raffo@ufmg.br)

**Abstract**— Continuous reheating furnaces are commonly used in the steel industry for annealing of the strips of steel coils that passed through the rolling process for reconstitution of the grains. These strips must be uniformly reheated, following a suitable temperature profile, so that they have the required mechanical and metallurgical properties. In addition, a dynamic temperature is desirable to control the reheating furnace satisfactory so as to reduce fuel consumption, such as consumption is responsible for one of the most expensive portions of the process operating costs. With the ultimate aim of developing a control strategy in a continuous reheating furnace in Aperam South America, the present study aims to propose a methodology that consists of experimental modeling, tuning PI and PID controllers, and implements an advanced control strategy (Feedforward) to the main loop of flow and temperature that compose the process.

**Keywords**— Process control, PID, Identification, Continuous reheating furnaces.

**Resumo**— Fornos contínuos de reaquecimento são comumente utilizados na indústria siderúrgica para recozimento das tiras das bobinas de aço que passam pelo processo de laminação para reconstituição dos grãos. Essas tiras devem ser reaquecidas uniformemente, seguindo um perfil apropriado, de forma que tenham as propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas. Além disso, é desejável um controle dinâmico de temperatura nos fornos de reaquecimento para que se reduza o consumo de combustível, já que tal consumo é responsável por uma das parcelas mais onerosas dos custos de operação do processo. Com o intuito final de implementar uma estratégia de controle em um forno de reaquecimento contínuo na Aperam South América, o presente trabalho tem por finalidade propor uma metodologia que consiste na modelagem experimental, sintonia de controladores PI e PID, e estudo de uma estratégia de controle avançado (controle antecipatório) para as principais malhas de vazão e temperatura que compõem o processo.

**Palavras-chave**— Controle de processos, PID, Identificação, Fornos contínuos de reaquecimento.

### 1 Introdução

Fornos contínuos de reaquecimento a combustão são muito usados em áreas de laminação a frio de bobinas no setor siderúrgico. Neles são recozidas as bobinas em forma de tiras, para que elas tenham as propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas. Para isso um bom controle da temperatura da tira, através do controle do forno, é necessário. Desde a década de setenta, os problemas de modelagem e controle de fornos contínuos de reaquecimento têm recebido considerável atenção (Yang and Lu, 1988). Podem ser levantadas duas principais razões para o interesse no estudo deste tipo de fornos, uma delas é que o problema de controle da temperatura da tira não é trivial devido à complexidade do processo (Yang and Lu, 1986).

Considerando que o aquecimento da tira seja feito pela absorção da energia fornecida pela atmosfera do forno, surgem os problemas de controle de temperatura e das vazões de ar e de combustível queimado em cada zona. Juntam-se a isso, as irregularidades dos materiais processados (pro-

porcionada pelas variações nas dimensões das tiras recozidas). Isto se dá devido ao processo ser contínuo sendo recozidos diferentes tipos de aço com diferentes larguras e espessuras. Além disso, cada tipo de aço possui um perfil de temperatura que deve ser adquirido ao longo do processo de recozimento, o que faz com que ao longo do forno tenha diferentes níveis de temperatura nas chamadas zonas de reaquecimento. Isto tudo converge para a necessidade de um bom controle individual da temperatura de cada zona. . Outro ponto importante é que estima-se que cerca de 15% do consumo global de energia nas indústrias siderúrgicas integradas ocorra em fornos de reaquecimento (Yang and Lu, 1988), trazendo o desafio da otimização do consumo deste processo.

O projeto de controladores eficazes e a implantação de técnicas de controle avançado em fornos de reaquecimento é desafiador, considerando a complexidade do processo, características não lineares, atrasos puros de tempo significativos e acoplamento entre as malhas. No entanto, técnicas tem sido estudadas e desenvolvidas utilizando métodos de otimização como Simplex na regula-

ção do PID (Wang et al., 1999), compensadores dinâmicos antecipatórios, auto-sintonia devido a não linearidade do processo, como a presença de histerese segundo (Zhang et al., 2002).

Neste trabalho é apresentada a modelagem de uma faixa de trabalho de temperatura de um forno de reaquecimento contínuo, utilizando técnicas de identificação de sistemas e projeto de uma estratégia de controle utilizando controladores PI e PID, associado a controladores antecipatórios (*Feedforward*) para atenuação das perturbações, a fim de se obter um controle que permita o recozimento de bobinas de aço em forma de tiras com qualidade e com baixo consumo.

## 2 Descrição do Processo

Esta seção descreve o processo do forno de reaquecimento contínuo de aço inox, da empresa Aperam South América, a ser controlado neste trabalho, apresentado na figura 1. Nesta figura são ilustradas duas zonas do forno que tem a finalidade de fazer tratamento térmico em bobinas de aço que passaram pelo processo de laminação, para reconstituição dos grãos, denominado recozimento. Para isso, deve-se controlar a temperatura da tira de aço medida na saída do forno através das temperaturas das zonas.

No entanto, um perfil de temperatura para a tira é requerido para seu recozimento, fazendo com que seja necessário expor a tira a diferentes níveis de temperatura em cada zona. Como se trata de um forno a combustão, utiliza-se queimadores a gás para fazer o aquecimento destas zonas, onde cada uma possui cerca de oito queimadores. O gás utilizado é uma mistura de GN (Gás Natural) e GAF (Gás de alto forno). Uma estação de mistura é necessária para controlar a relação destes gases de acordo com o PCI (poder calorífico inferior) especificado.

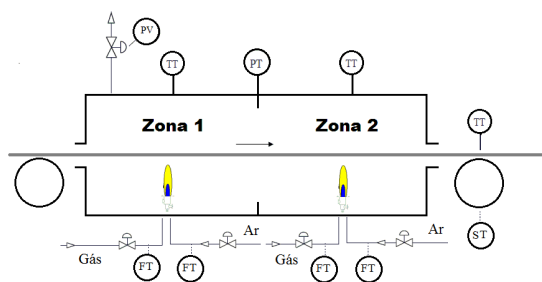


Figura 1: Forno de reaquecimento contínuo.

Um controle de pressão é necessário para ambas as zonas para garantir pressão positiva de forma a não entrar ar do ambiente externo no interior do forno e prejudicar a relação de ar e gás combustível.

Neste processo existem variações de velocidade da tira dentro do forno, o que faz com que

haja variações do fluxo de material “frio” que entra no forno, causando perturbações na temperatura. Além disso, devido às características físicas do processo, o forno tem suas zonas acopladas. Esse acoplamento ocorre em função da conexão física existente entre tais zonas e do sistema de controle da pressão interna, o qual favorece um deslocamento do fluxo de calor da zona 2 (saída do forno) para a zona 1, o que faz com que o calor gerado em uma zona seja transferido para a outra, causando também perturbações na temperatura de cada zona.

### 2.1 Modelagem matemática

Devido à complexidade de obtenção dos modelos baseados na física do processo, os quais resultam em equações diferenciais não-lineares com parâmetros distribuídos (Teixeira et al., 2007), são utilizadas técnicas de identificação de sistemas para a modelagem dos fenômenos dinâmicos que ocorrem entre as vazões de combustíveis e de ar e as temperaturas nas zonas do forno.

Neste artigo foi empregado o método de Sundaresan (Aguirre, 2007) para modelar apenas uma faixa de temperatura ( $1000^{\circ}\text{C}$  a  $1200^{\circ}\text{C}$ ) onde se processam a maioria dos materiais fabricados a fim de se obter os parâmetros de modelos de vazão e de temperatura representados através de funções de transferência de segunda ordem com tempo morto. Este método pressupõe que o sistema em questão pode ser aproximado satisfatoriamente por funções de transferência de segunda ordem do tipo:

$$H(s) = \frac{e^{-\tau_d s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (1)$$

ou,

$$H(s) = \frac{K\omega_n^2 e^{-\tau_d s}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

Modelos do tipo (1) são usados para descrever sistemas dinâmicos lineares de segunda ordem e sobreamortecidos e modelos do tipo (2) representam sistemas subamortecidos. O objetivo do método é determinar os parâmetros  $\tau_d$ ,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  ou  $\tau_d$ ,  $\omega_n$  e  $\zeta$  da respectiva função de transferência, a partir de uma resposta ao degrau.

O modelo do processo é representado em diagrama de blocos, conforme ilustrado na Figura 2. As funções de transferência apresentadas na Figura 2 significam:  $G_{tz1}(s)$ , modelo da dinâmica da temperatura da zona 1;  $G_{tz2}(s)$ , modelo da dinâmica da temperatura da zona 2;  $G_{az1z2}(s)$ , modelo do acoplamento existente da zona 1 na zona 2;  $G_{az2z1}(s)$ , modelo do acoplamento existente da zona 2 na zona 1;  $G_{vz1}(s)$ , modelo da dinâmica da vazão de gás combustível da zona 1;  $G_{vz2}(s)$ , modelo da dinâmica da vazão de gás combustível da zona 2;  $D_{vz1}(s)$ , modelo da perturbação da velocidade na zona 1; e  $D_{vz2}(s)$ , modelo da perturbação da velocidade na zona 2.

As entradas e saídas do processo são: U1, referência de abertura de válvula de gás combustível da zona 1; U1.1, vazão de gás combustível da zona 1; U2, referência de abertura de válvula de gás combustível da zona 2, U2.1, vazão de gás combustível da zona 2; Y1, temperatura de saída da zona 1; Y2, temperatura de saída da zona 2; e Q, velocidade do processo.

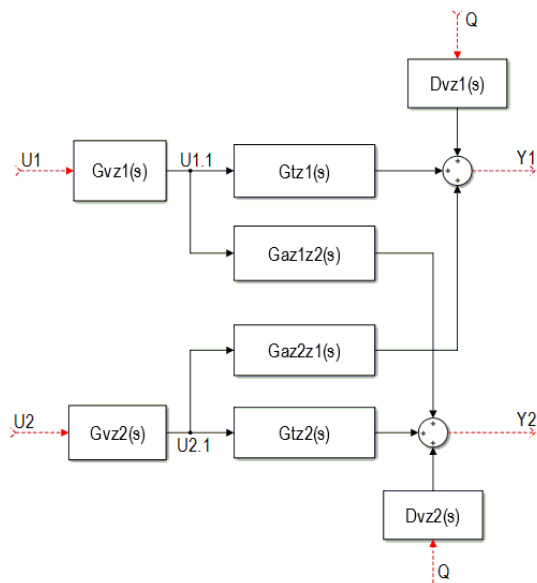


Figura 2: Diagrama de blocos do processo.

As dinâmicas das malhas de vazão de ar de combustão não foram consideradas neste trabalho por apresentarem resposta similar à vazão de gás combustível, conforme já identificado em outro momento.

Para modelar o processo definiu-se o seguinte procedimento: i) estabilizam-se ambas as zonas na faixa de temperatura que se deseja modelar, colocando todas as demais variáveis envolvidas, como pressão do forno, composição dos gases e velocidade do processo de acordo com o usado em materiais nesta faixa de temperatura; ii) coloca-se as malhas em manual, de temperatura e vazão; iii) aplica-se degrau de vazão de gás combustível na zona 1 e coleta-se as informações de temperatura; iv) aplica-se degrau de vazão de gás combustível na zona 2 e coleta-se as informações de temperatura; v) aplica-se degrau de vazão de gás combustível na zona 1 e coleta-se as informações de temperatura da zona 2; vi) aplica-se degrau de vazão de gás combustível na zona 2 e coleta-se as informações de temperatura da zona 1; vii) aplica-se degrau de abertura da válvula de gás combustível da zona 1 e coleta-se as informações de vazão; viii) aplica-se degrau de abertura da válvula de gás combustível da zona 2 e coleta-se as informações de vazão; ix) aplica-se degrau na velocidade e coleta-se as informações de temperatura da zona 1; x) aplica-se degrau na velocidade e coleta-se as informações de temperatura da zona 2.

Para modelar o sistema, foi utilizado sistemas de coletas de dados PIMS (Process Information Management System) e o sistema de supervisão FactoryLink (Siemens), que foram modificados para que a taxa de amostragem para vazão fosse de 0,5 segundos e temperatura de 5 segundos.

### 2.1.1 Modelos das dinâmicas das malhas de temperatura

Para modelar as dinâmicas das temperaturas das zonas, aplicou-se um degrau de vazão de 100 Nm<sup>3</sup>/h de gás combustível e um degrau de vazão de ar proporcional nas duas zonas em tempos distintos.

O degrau e a reação das temperaturas podem ser vistos nas figuras 3 e 4. O modelo encontrado para zona 1 é dado por:

$$Gtz1(s) = \frac{0.4786e^{-0.0964s}}{(46.0196s + 1)(42.7982s + 1)} \quad (3)$$

O modelo encontrado para zona 2 é:

$$Gtz2(s) = \frac{0.4e^{-0.161s}}{(42.2135s + 1)(26.1724s + 1)} \quad (4)$$

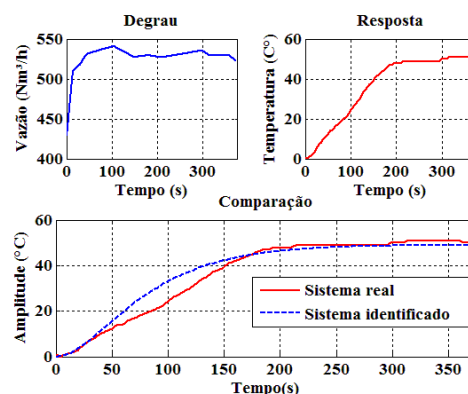


Figura 3: Resultado do modelo Gtz1(s) identificado.

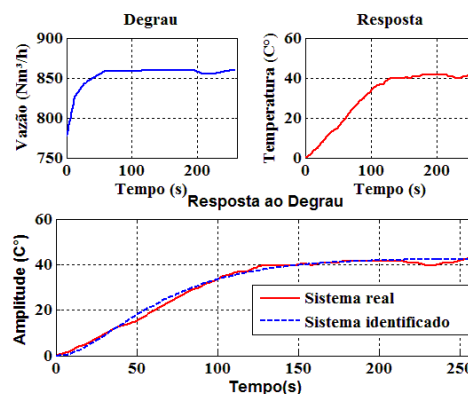


Figura 4: Resultado do modelo Gtz2(s) identificado.

Podemos considerar que em ambas as zonas o atraso é desprezível, mesmo porque a taxa de amostragem foi de 5 segundos. Além disso, pode-se notar que as constantes de tempo são próximas (menor que 10 vezes uma da outra), sendo assim indicada a necessidade de projetar um controlador PID.

Também foi dado um degrau negativo de vazão para identificar a dinâmica. No entanto, esse degrau negativo foi dado somente na zona 2 devido à indisponibilidade do equipamento, porém consideraremos que os resultados encontrados como dinâmica da planta de temperatura para degraus negativos de ambas as zonas. O degrau e a reação da temperatura são apresentados na figura 5. Os resultados mostram que existe uma histerese no sistema tanto no ganho quanto na dinâmica da planta de temperatura. Chamaremos esta dinâmica de  $G_{th}$ :

$$G_{th}(s) = \frac{0.2127e^{-5.97s}}{(28.7678s + 1)(17.2711s + 1)} \quad (5)$$

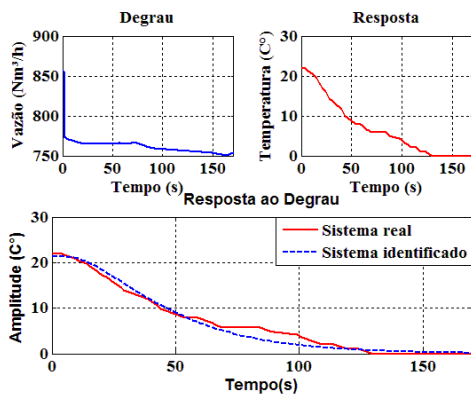


Figura 5: Resultado do modelo  $G_{th}(s)$  identificado.

### 2.1.2 Modelos do acoplamento das zonas

Para modelar as dinâmicas do acoplamento das zonas, aplicou-se um degrau de vazão de  $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de gás combustível e um degrau de vazão de ar proporcional nas duas zonas em tempos distintos, registrando a temperatura da zona subsequente.

O degrau e a reação das temperaturas podem ser vistos nas figuras 6 e 7.

$$G_{az1z2}(s) = \frac{8.6687 \times 10^{-5} e^{-54.8s}}{s^2 + 0.0305s + 0.000449} \quad (6)$$

$$G_{az2z1}(s) = \frac{2.1536 \times 10^{-4} e^{-9.83s}}{s^2 + 0.03482s + 0.000585} \quad (7)$$

Podemos identificar um atraso significativo na influência da zona 1 na zona 2 e que a influência da zona 2 na zona 1 é mais rápida, com um ganho muito maior. Isto tem uma explicação física, se deve ao sentido do fluxo de fumaça interna no forno ser da zona 2 para zona 1.

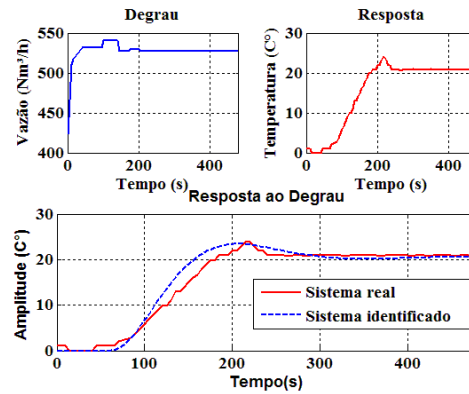


Figura 6: Resultado do modelo  $G_{az1z2}(s)$  identificado.

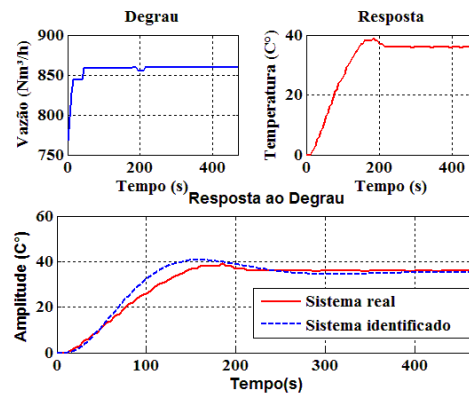


Figura 7: Resultado do modelo  $G_{az2z1}(s)$  identificado.

### 2.1.3 Modelos das dinâmicas das vazões de gás combustível das zonas

Para modelar as dinâmicas das temperaturas das zonas, aplicou-se um degrau de abertura 10% da válvula de gás combustível nas duas zonas, coletando as vazões registradas.

O degrau e a reação das vazões são apresentados nas figuras 8 e 9.

$$G_{vz1}(s) = \frac{16.77e^{-1.34s}}{6.421s^2 + 5.375s + 1} \quad (8)$$

$$G_{vz2}(s) = \frac{13.4e^{-0.338s}}{8.496s^2 + 6.183s + 1} \quad (9)$$

Podemos considerar que em ambas as zonas o atraso é desprezível. Outro fator importante é que as constantes de tempo são próximas, no entanto como a dinâmica de vazão é mais rápida e o processo é ruidoso, o sistema é aproximado por um modelo de primeira ordem. Além disso, a histerese relacionada à abertura da válvula foi considerada desprezível na situação.

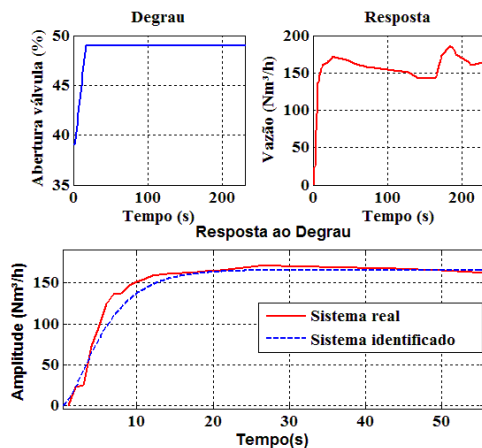


Figura 8: Resultado do modelo  $Gvz1(s)$  identificado.

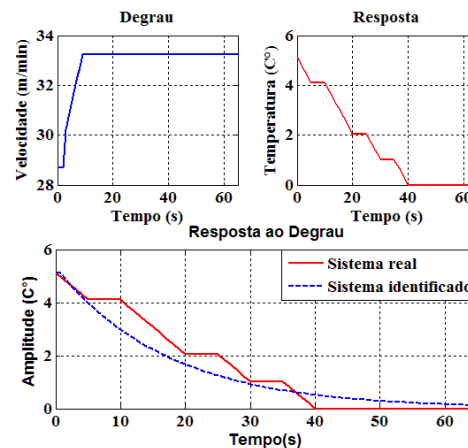


Figura 10: Resultado do modelo  $Dvz1(s)$  identificado.

### 3 Estratégia de Controle

Com o intuito de obter seguimento de referência e rejeição das perturbações com um tempo de subida menor que 100 (s), sobressinal menor que  $15^\circ C$  em ambas as zonas, fornecer resposta não oscilatória e erro nulo em regime permanente, baseado nos modelos matemáticos determinados para as malhas de vazão e de temperatura, bem como nos modelos que representam o efeito da variação da velocidade do processo e nos modelos de perturbações das outras zonas, foram definidas novas propostas de estratégias de controle bem como realizado a sintonia dos controladores.

Propõe-se a seguinte estratégia de controle composta por controladores PI e PID em cascata e controladores antecipatórios (*Feedforward*): i) para controlar a vazão de gás como malha interna do controle cascata, propõe-se um controlador PI devido a ser um processo ruidoso e uma malha de dinâmica rápida, não sendo indicado usar uma ação derivativa; ii) para o controle da temperatura como malha externa do controle cascata, que possui uma dinâmica mais lenta se comparada a de vazão, propõe-se um controlador PID; iii) como o sistema possui limitação física de vazão de gás, propõem-se utilizar a técnica Anti-Windup (Aström and Hägglund, 2006) nos controladores PI e PID, a fim de não permitir que em situação de saturação o termo integral continue se carregando; iv) considerando que os fornos de reaquecimento são sistemas multivariáveis com forte acoplamento e com grandes atrasos puros de tempo, propõem-se a implementação de desacopladores dinâmicos que podem ser visto como um compensador antecipatório (*Feedforward*); v) como a perturbação causada pela velocidade é medida, podemos usar compensadores *Feedforward* para atenuar a perturbação causada nas duas zonas. Em ambos os casos, além de atenuar estas perturbações utilizando estes controladores, garantimos a rejeição destas em

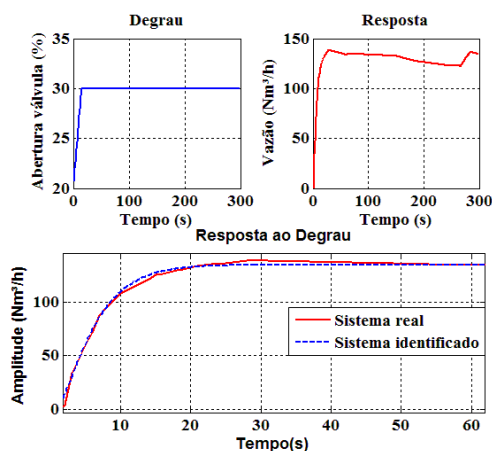


Figura 9: Resultado do modelo  $Gvz2(s)$  identificado.

#### 2.1.4 Modelo da perturbação da velocidade nas zonas

Para modelar a dinâmica da perturbação da velocidade nas zonas, foi aplicado degrau de velocidade 5 m/min na linha de produção e observado o comportamento da temperatura nas zonas. O degrau e a reação da temperatura são mostrados na Figura 10.

$$Dvz_1(s) = -\frac{1.0256e^{-0.495s}}{2.97s^2 + 17.4s + 1} \quad (10)$$

Devido às dificuldades já mencionadas de aplicar degrau no forno e aguardar estabilizar, não foi possível coletar dados consistentes para levantar um modelo que seja representativo a esta perturbação. Os dados usados foram coletados durante o processo de um material que não é representativo, sendo necessário que se modele novamente. Apesar disso, o modelo obtido foi utilizado para fins de simulação. Como a resposta à perturbação da velocidade foi semelhante nas duas zonas, representamos somente a da zona 1 na figura 10.

regime permanente com a ação integral dos controladores PID em malha fechada.

Os controladores propostos para atender as especificações são: i) FF1(s), controlador *Feedforward* para atenuar a perturbação do acoplamento existente da zona 2 na zona 1; ii) FF2(s), controlador *Feedforward* para atenuar a perturbação do acoplamento existente da zona 1 na zona 2, iii) FF3(s), controlador *Feedforward* para atenuar a perturbação da velocidade na zona 1; iv) FF4(s), controlador *Feedforward* para atenuar a perturbação da velocidade na zona 2; v) Ct1(s); controlador PID e limitador com ação Anti-Windup para temperatura da zona1; vi) Ct2(s), controlador PID e limitador com ação Anti-Windup para temperatura da zona2, vii) Cv1(s), controlador PI e limitador com ação Anti-Windup para vazão de gás da zona1; viii) Cv2(s), controlador PI e limitador com ação Anti-Windup para vazão de gás da zona2.

### 3.1 Sintonia dos Controladores

Os controladores *Feedforward* de pré-alimentação da perturbação foram ajustados da seguinte maneira:

$$FF1(s) = \frac{-0.3873s^2 - 0.0183s - 0.0001}{0.4786s^2 + 0.0167s + 0.0003} \quad (11)$$

$$FF2(s) = \frac{-0.0958s^2 - 0.0059s - 0.0001}{0.4s^2 + 0.0122s + 0.0002} \quad (12)$$

$$FF3(s) = \frac{-1.0280}{2.97s^2 + 17.4s + 1} \quad (13)$$

$$FF4(s) = \frac{-0.6566}{0.4786s^2 + 0.0167s + 0.0003} \quad (14)$$

Os controladores PID especificado para temperatura e PI para vazão foram sintonizados por síntese direta (Seborg et al., 2003). Especificou-se o seguinte comportamento em malha fechada para realizar a sintonia: constantes de tempo (?) desejadas em malha fechada das malhas de temperatura fossem iguais a 30s e para ambas as malhas de vazão iguais a 1s. Os parâmetros dos controladores encontrados são: v) Ct1(s):  $K_p = 6.186$ ,  $T_i = 88.818$ ,  $T_d = 22.175$ ; vi) Ct2(s):  $K_p = 5.699$ ,  $T_i = 68.386$ ,  $T_d = 16.156$ ; vii) Cv1(s):  $K_p = 0.107$ ,  $T_i = 1.79$ ; viii) Cv2(s):  $K_p = 0.194$ ,  $T_i = 2.61$ .

## 4 Resultados

### 4.1 Resultados da simulação

Desenvolveu-se em Matlab/Simulink uma simulação com o controle dos processos modelados. Nesta simulação consideraram-se todos os modelos identificados inclusive a histerese de temperatura em relação à vazão, sendo considerada a mesma para ambas as zonas. Sendo assim, o modelo ao qual é aplicado o sinal de controle é alternado para sinal crescente ou decrescente, tentando retratar ao máximo o comportamento do sistema.

Analizou-se o desempenho do sistema de controle através do tempo de subida e sobressinal em malha fechada, além de uma análise dos índices de desempenho IEA (Integral do erro absoluto) e IEQ (Integral do erro quadrático), que medem o erro da variável controlada com relação à referência (Aström and Hägglund, 2006). Considerou-se também para avaliar o controle o consumo de gás combustível obtido através da totalização do gás.

Como o modelo foi realizado para a faixa de trabalho de 1000 a 1200°C considerada linear, a simulação é realizada para degraus de temperatura a partir da temperatura de 1000°C e sempre considerando o limite físico das zonas de 1000 Nm<sup>3</sup>/h. Como partiremos da temperatura de 1000°C, consideramos que a vazão para manter esta temperatura é de 300 Nm<sup>3</sup>/h na zona 1 e de 500 Nm<sup>3</sup>/h na zona 2, valores estes levantados na modelagem.

#### 4.1.1 Primeira simulação

Na primeira simulação foi aplicado um degrau de referência para a malha de temperatura da zona 1 de 100°C e na zona 2 de 50°C simultaneamente, ou seja, simulando a mudança de temperatura de 1000°C para 1100°C na zona 1 e de 1000°C para 1050°C na zona 2, considerando todos os controladores propostos e um comparativo sem a aplicação dos controladores *Feedforward*. A resposta é mostrada nas figuras 11 e 12, respectivamente.

Para este degrau, considerando a aplicação de todos os controladores propostos, foram encontrados os seguintes valores de desempenho na zona 1: tempo de subida ( $s$ ) = 98, sobressinal ( $^{\circ}C$ ) = 1.

Para o mesmo degrau, desconsiderando o efeito dos controladores *Feedforward*, foram encontrados os seguintes valores de desempenho na zona 1: tempo de subida ( $s$ ) = 59, sobressinal ( $^{\circ}C$ ) = 0.38.

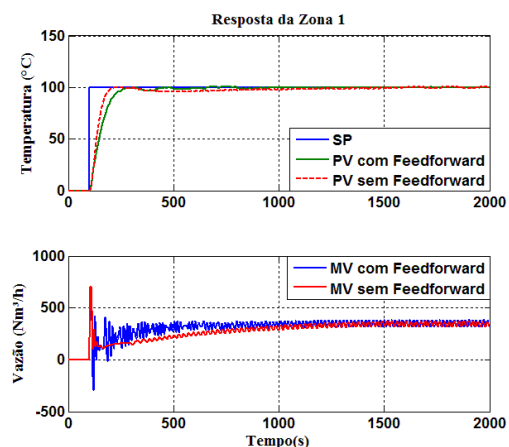


Figura 11: Resposta simulada da zona 1.

Para a zona 2, foram encontrados os seguintes valores de desempenho considerando a aplicação de todos os controladores propostos: tempo

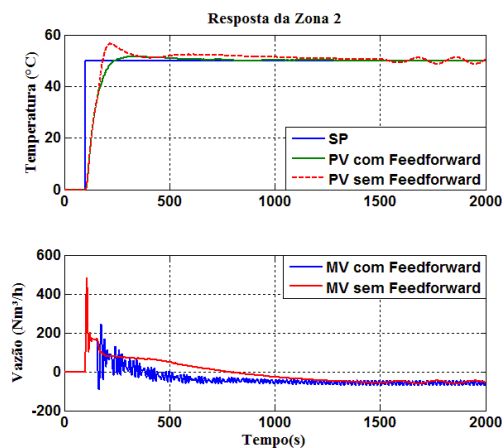


Figura 12: Resposta simulada da zona 2.

Tabela 1: Comparativo de Desempenho

|                               | IEA  | IEQ       | Consumo ( $m^3$ ) |
|-------------------------------|------|-----------|-------------------|
| Zona 1 com <i>Feedforward</i> | 6509 | $3.41e+5$ | 337               |
| Zona 1 sem <i>Feedforward</i> | 6981 | $2.80e+5$ | 318               |
| Zona 2 com <i>Feedforward</i> | 2755 | $6.98e+4$ | 261               |
| Zona 2 sem <i>Feedforward</i> | 4599 | $7.35e+4$ | 274               |

de subida ( $s$ ) = 81, sobressinal ( $^{\circ}C$ ) = 3.12.

Desconsiderando o efeito dos controladores *Feedforward*, os valores encontrados para a zona 2 foram: tempo de subida ( $s$ ) = 61, sobressinal ( $^{\circ}C$ ) = 12.55.

Em ambas as zonas, foram encontrados resultados dentro da especificação de tempo de subida menor que 100 ( $s$ ) e um sobressinal menor que 15  $^{\circ}C$  ao aplicar todos os controladores. Quando não se aplicou os controladores *Feedforward*, na zona 2 observou-se um sobressinal maior, mesmo que menor que o especificado, além de oscilações. Isto refletiu no índice de desempenho IEA e IEQ mostrados na tabela 2 que, exceto no IEQ da zona 1, todos foram melhores aplicando o controlador.

No entanto o tempo de subida foi menor para ambas as zonas quando não se aplicou os controladores *Feedforward*, isso mostra que o mesmo tornou o controle mais lento. O consumo geral mostrado pela tabela 2, também foi ligeiramente maior utilizando os controladores *Feedforward*.

#### 4.1.2 Segunda simulação

Para analisar o desempenho em múltiplos degraus, foram simulados degraus diversos de temperatura diferentes nas zonas e simulado um degrau na velocidade. Para avaliar o desempenho será analisado os índices IEA, IEQ e o consumo de gás combus-

tível.

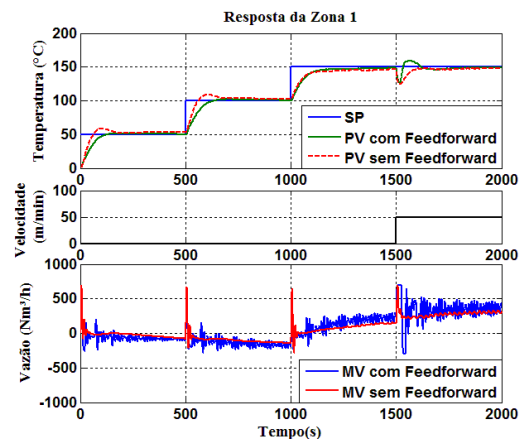


Figura 13: Resposta simulada da zona 1.

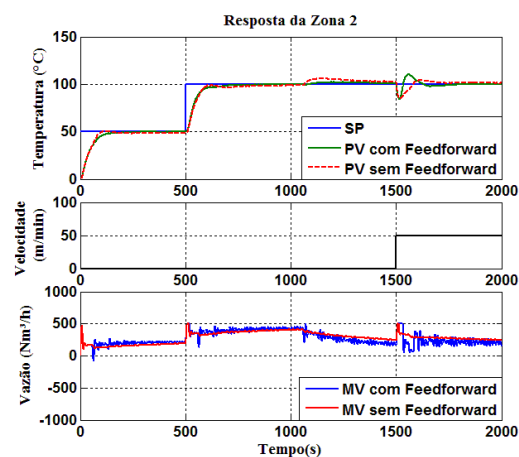


Figura 14: Resposta simulada da zona 2.

Tabela 2: Comparativo de Desempenho

|                               | IEA       | IEQ       | Consumo ( $m^3$ ) |
|-------------------------------|-----------|-----------|-------------------|
| Zona 1 com <i>Feedforward</i> | $1.09e+4$ | $2.42e+5$ | 206               |
| Zona 1 sem <i>Feedforward</i> | $1.30e+4$ | $2.17e+5$ | 201               |
| Zona 2 com <i>Feedforward</i> | $6.88e+3$ | $1.51e+5$ | 431               |
| Zona 2 sem <i>Feedforward</i> | $8.98e+3$ | $1.65e+5$ | 435               |

Observou-se que em geral os índices de desempenho melhoraram com a aplicação dos controladores *Feedforward*, mesmo deixando a resposta mais lenta, isto porque as perturbações que afetam o processo foram atenuadas sem aumentar significativamente o consumo de combustível, conforme mostra a tabela 2.

## 5 Conclusões

Foram alcançados os objetivos especificados de controle ao garantir sobressinal menor que  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  e tempo de subida menor que 100 (s), considerando os limites físicos da planta e a histerese identificada.

Os controladores *Feedforward* foram eficientes em reduzir os efeitos das perturbações, o que é bom para a qualidade do recozimento, sem aumentar significativamente o consumo de gás combustível. Isto ficou claro observando a redução do sobressinal na presença das perturbações. No entanto, os controladores *Feedforward* deixaram as respostas mais lentas, afetando principalmente o índice de desempenho IEQ da zona 1.

Como trabalhos futuros serão realizadas a validação dos modelos levantados e obtidos os modelos que não foram possíveis identificar devido ao uso contínuo do processo. Também objetivase projetar um controlador PID auto-sintonizável através de otimização, com técnicas de identificação de parâmetros dos modelos online, a fim de conseguir sintonizar os controladores para uma possível mudança no comportamento da planta, além de considerar a não linearidade do processo, como a histerese.

Zhang, B., Cheng, Z., Xu, L., Wang, J., Zhang, J. and SHAO, H. (2002). The modeling and control of a reheating furnace, *Proceedings of the American Control Conference, May, 8-10* pp. 3823–3828.

## Referências

- Aguirre, L. A. (2007). *Introdução à Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não-lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, Editora UFMG.
- Aström, K. J. and Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Controllers*, ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A. and Doyle III, F. J. (2003). *Process Dynamics and Control*, 2 edn, John Wiley.
- Teixeira, B. O. S., Jota, F. G. and Teixeira, M. H. (2007). Modelagem, controle e otimização do processo dos fornos de reauecimento de placas, *Controle e Automação (Impresso)* **18**: 67–93.
- Wang, Z., Chai, T., Guan, S. and Shao, C. (1999). Hybrid optimization setpoint strategy for slab reheating furnace temperature, *American Control Conference*.
- Yang, Y. and Lu, Y. (1986). Development of a computer control model for slab reheating furnaces, *Computers in Industry* **7**: 145–154.
- Yang, Y. and Lu, Y. (1988). Dynamic model based optimization control for reheating furnaces, *Computers in Industry* **10**: 11–20.