

MODELO PARA CONTROLE AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA DE REGENERADORES DE CÂMARA DE COMBUSTÃO EXTERNA¹

Hugo Leonardo Oliveira Cardoso²
Ramon Almeida da Silva³
Giuleano Oliveira Goncalves⁴
Carlos Emilio Carra Citteli³

Resumo

O modelo foi desenvolvido com o objetivo de efetuar o controle automático dos estágios de aquecimento, e posterior controle da temperatura de domo e chaminé dos regeneradores com câmara de combustão externa dos altos-fornos da ThyssenKrupp CSA - Companhia Siderúrgica do Atlântico. Foram levadas em consideração as variações das características físico-químicas e composição dos combustíveis utilizados, assim como realizar a combustão e transporte do calor para encharque do empilhamento refratário de forma eficiente.

Palavras-chave: Automação; Controle; Regenerador; Alto-Forno.

MODEL FOR AUTOMATIC CONTROL OF TEMPERATURE ON EXTERNAL COMBUSTION CHAMBER STOVES

Abstract

The model was developed with the aim of making the automatic control of heating stages, and further dome and chimney temperature control of regenerators with external combustion chamber of the blast furnace from ThyssenKrupp CSA - Companhia Siderúrgica do Atlântico. It was taken into consideration the variations of physical and chemical characteristics and composition of the used fuels, and to perform the combustion and heat transport to soak the refractory stacking efficiently.

Key words: Automation; Control; Hot Stoves; Blast Furnace.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Engenheiro Eletricista / Eletrônica (ThyssenKrupp CSA).

³ Engenheiro Metalurgista (ThyssenKrupp CSA).

⁴ Engenheiro de Computação (ThyssenKrupp CSA).

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo descrever a metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema de controle automático durante a fase de aquecimento dos regeneradores dos Altos Fornos da ThyssenKrupp CSA.

A função dos regeneradores é o armazenamento de energia térmica no empilhamento refratário para posterior troca de calor entre refratários e sopro frio, elevando a temperatura de sopro de 100°C para uma temperatura em torno de 1.250°C após a câmara de mistura, gerando desta forma o sopro quente que será inflado nos altos fornos através das ventaneiras.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Entendendo as Etapas do Aquecimento

A fase de aquecimento de um regenerador divide-se em duas etapas principais, descritas nos itens 2.1.1 e 2.1.2. A Figura 2 mostra o comportamento cíclico das temperaturas de domo e chaminé ao longo do tempo numa operação normal do sistema.

2.1.1 Atingir a temperatura de domo

Nesta etapa a combustão é realizada com a menor relação ar/gás possível, garantindo apenas que a combustão seja completa e que a temperatura de chama seja a máxima possível. Este controle é realizado através do percentual de O₂ nos fumos medido na chaminé, ou através da relação ar/gás resultante da soma da relação ar/gás estequiométrica ($\lambda_{0,SP}$) com o excesso de ar mínimo (e_{min}). Após a temperatura desejada de domo ser atingida, o que acontece em torno de 1.400°C, o controle tem como objetivo manter a temperatura de domo e realizar o transporte de calor para o empilhamento refratário.

2.1.2 Encharque

Na etapa de encharque a relação ar/gás é controlada para que a temperatura do domo se mantenha e o calor seja transportado para o empilhamento refratário e armazenado para o aquecimento do sopro frio. Para que tenhamos a garantia que o empilhamento armazene o calor necessário, temos que garantir que a temperatura de chaminé atinja em torno de 350°C.

2.2 Equacionamento do Modelo

Para realização do controle foram definidos alguns parâmetros de processo que são inseridos pela engenharia de processo, os quais normalmente não são alterados freqüentemente, outros são calculados conforme a dinâmica do processo e outros são medidos. O controle foi desenvolvido para a menor intervenção humana possível, tendo o operador que entrar apenas com dois parâmetros no sistema: *setpoint* de temperatura de domo; e *setpoint* de temperatura de chaminé.

A Figura 1 mostra a seqüência de cálculos e determinação das variáveis necessárias para se efetuar o controle, incluindo o equacionamento utilizado em cada passo do processo.

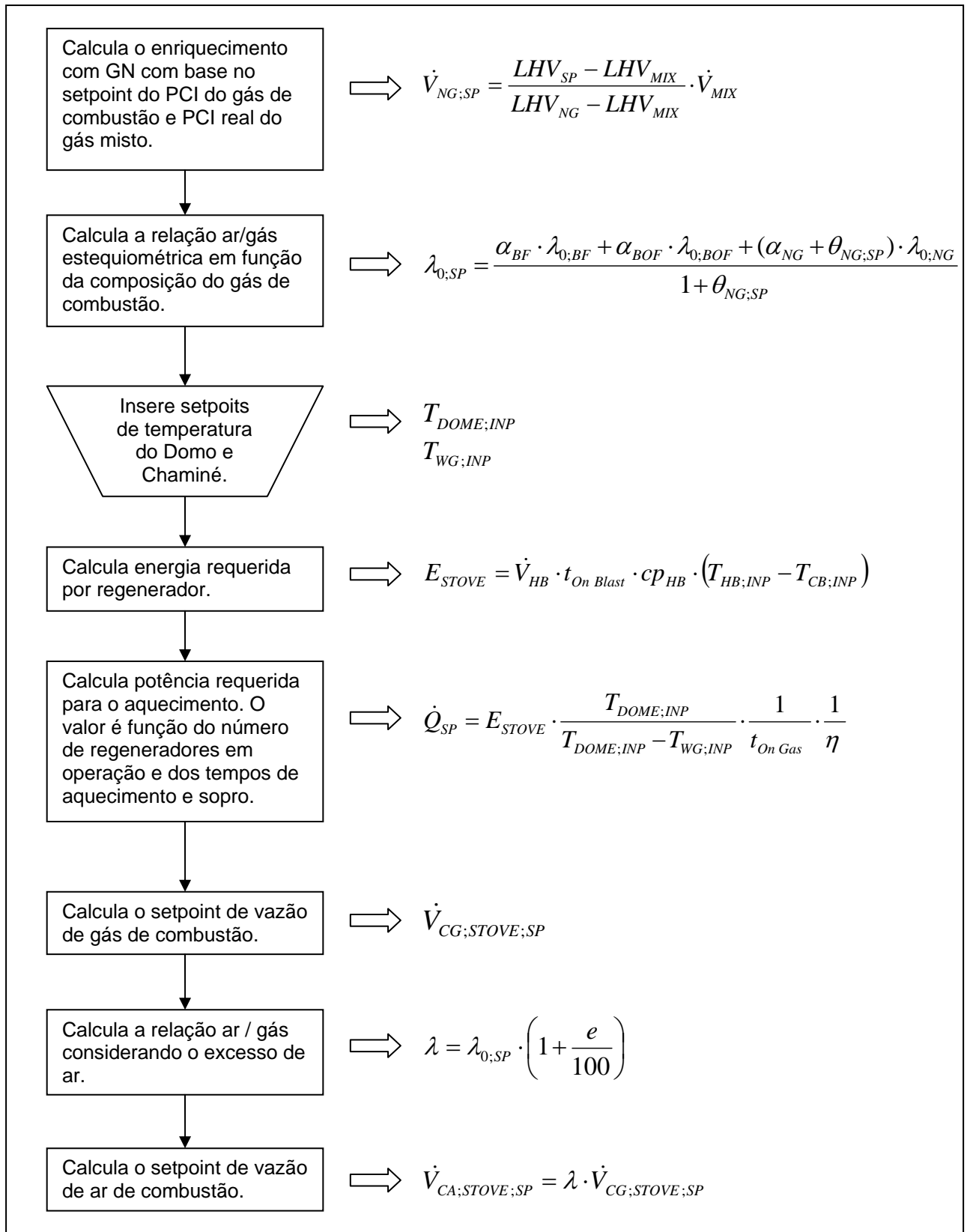


Figura 1. Principais equacionamentos do modelo.

A Tabela 1 descreve as variáveis das equações da Figura 1.

Tabela 1. Descrição das variáveis⁽¹⁾

Variável	Descrição	Unidade	Origem
$T_{DOME;INP}$	Setpoint de temperatura do domo.	[°C]	Entrada do Operador
$T_{WG;INP}$	Setpoint de temperatura de chaminé.	[°C]	Entrada do Operador
\dot{V}_{HB}	Vazão de sopro quente.	[Nm ³ /h]	Medido
LHV_{MIX}	Lower Heating Value (PCI) do gás misto.	[kJ/Nm ³]	Medido
$T_{HB;INP}$	Temperatura desejada do sopro quente.	[°C]	Parâmetro
$T_{CB;INP}$	Temperatura do sopro frio.	[°C]	Parâmetro
$t_{on\ blast}$	Tempo de duração do sopro.	[min]	Parâmetro
$\lambda_{0;BF}$	Relação ar/gás estequiométrica: gás de alto forno.	[-]	Parâmetro
$\lambda_{0;BOF}$	Relação ar/gás estequiométrica: gás de aciaria.	[-]	Parâmetro
$\lambda_{0;NG}$	Relação ar/gás estequiométrica: gás natural.	[-]	Parâmetro
e_{min}	Excesso de ar mínimo em [%]	[0..100]	Parâmetro
e	Excesso de ar em [%]	[0..100]	Parâmetro
LHV_{NG}	Lower Heating Value (PCI) do gás natural.	[kJ/Nm ³]	Parâmetro
LHV_{SP}	Setpoint do PCI do gás de combustão.	[kJ/Nm ³]	Parâmetro
η	Eficiência do regenerador.	[-]	Parâmetro
$t_{on\ gas}$	Tempo de duração da fase de aquecimento.	[min]	Parâmetro
cp_{HB}	Calor específico do sopro quente.	[kJ/Nm ³ °C]	Calculado
\dot{Q}_{SP}	Setpoint de potência para o aquecimento.	[MW]	Calculado
$\theta_{NG;SP}$	Percentual de enriquecimento de gás natural.	[0-100]	Calculado
$\alpha_{MIX;BF}$	Proporção de BF no gás misto.	[-]	Calculado
$\alpha_{MIX;BOF}$	Proporção de BOF no gás misto.	[-]	Calculado
$\alpha_{MIX;NG}$	Proporção de gás natural no gás misto.	[-]	Calculado
$\dot{V}_{CG;STOVE;SP}$	Setpoint de vazão do gás de combustão.	[Nm ³ /h]	Calculado
$\lambda_{0;SP}$	Relação ar/gás estequiométrica: gás de combustão (após enriquecimento).	[-]	Calculado
λ	Setpoint de relação ar/gás.	[-]	Calculado
$\dot{V}_{CA;STOVE;SP}$	Setpoint de vazão do ar de combustão.	[Nm ³ /h]	Calculado
$\dot{V}_{NG;SP}$	Setpoint de vazão do gás natural.	[Nm ³ /h]	Calculado
\dot{V}_{MIX}	Vazão de gás misto.	[Nm ³ /h]	Calculado

Durante a etapa de se atingir a temperatura de domo o controle pode ser realizado por dois modos de controle, como descrito no item 2.1.1:

- $\lambda = f_{(O_2)}$, onde a relação ar/gás é função do percentual de O_2 na chaminé; e
- $\lambda = \lambda_{0,SP} \cdot \left(1 + \frac{e_{\min}}{100}\right)$, onde a relação ar/gás é função da relação ar/gás estequiométrica e do excesso de ar mínimo.

Durante o encharque a temperatura de domo é controlada para se manter no *setpoint*, e a temperatura de chaminé segue uma rampa de *setpoint* conforme a equação abaixo.

$$T_{WG;RAMP;SP} = T_{WG;DTR} + \left(\frac{T_{WG;INP} - T_{WG;DTR}}{t_{on\ gas} - t_{elapsed;DTR}} \right) \cdot t$$

Onde:

- $T_{WG;RAMP;SP}$ = Rampa de setpoint de temperatura de chaminé;
- $T_{WG;DTR}$ = Temperatura de chaminé ao se atingir a temperatura de domo;
- $T_{WG;INP}$ = Setpoint de temperatura de chaminé; e
- $(t_{on\ gas} - t_{elapsed;DTR})$ = expressão que determina o tempo de aquecimento restante (*duração da fase de aquecimento – tempo decorrido para atingir a temperatura de domo*).

2.3 Sistema de Controle

O sistema é composto por duas malhas de controle principais; a malha de controle da relação ar/gás; e a malha de controle da vazão de gás de combustão.

A malha de controle da relação ar/gás efetua o controle da temperatura de chama, garantindo desta forma a temperatura necessária para manter a temperatura de domo.

Após a temperatura de domo ser atingida, como já descrito anteriormente, inicia-se a etapa de aquecimento, onde se deve manter a temperatura de domo e aumentar a quantidade de fumos gerados na combustão para transporte de calor para o empilhamento refratário.

A malha de controle da vazão de gás de combustão garantirá que a energia térmica necessária, assim como o volume de fumos para transporte seja suficiente para o controle da temperatura de chaminé de acordo com a rampa de setpoint gerada.

Os diagramas de blocos das Figuras 3 e 4 representam as malhas de controle da temperatura de chaminé e da temperatura de domo, respectivamente.

3 RESULTADOS

O gráfico da Figura 2 é resultado da implementação do sistema de controle descrito nos regeneradores da ThyssenKrupp CSA. Os mesmos foram obtidos durante a fase operacional dos altos fornos. Não existem gráficos anteriores pelo fato do sistema ter sido implementado antes do comissionamento da unidade operacional.

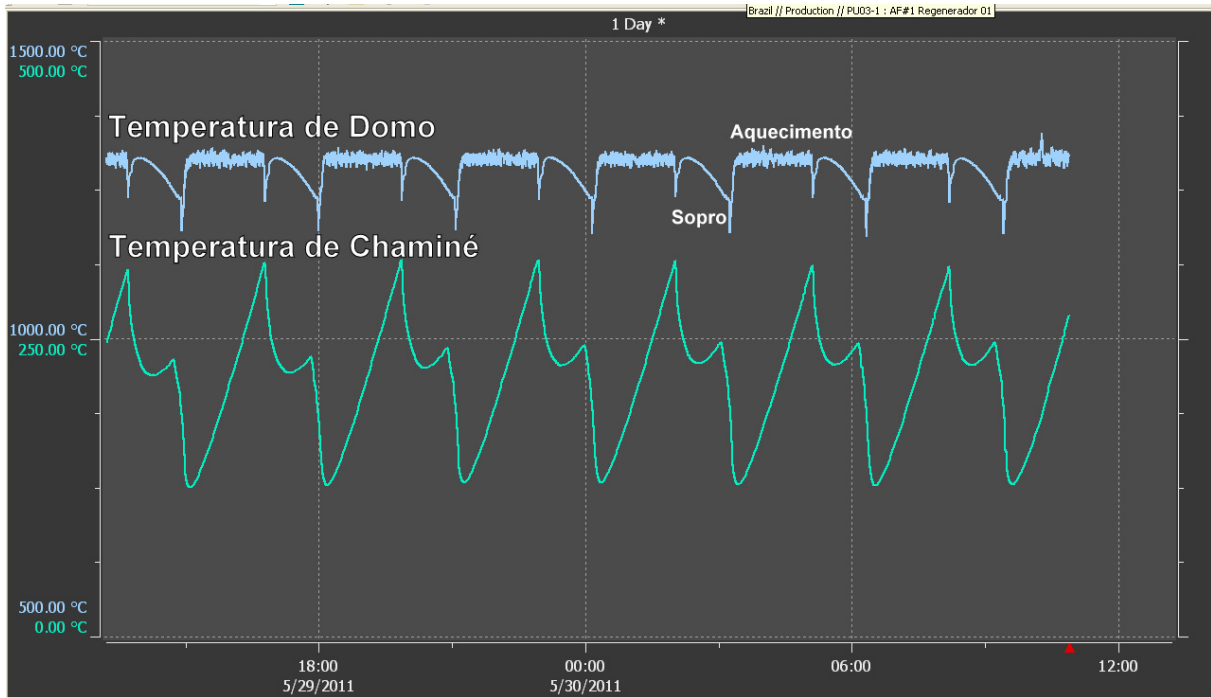


Figura 2. Gráfico histórico de 24 horas das temperaturas de domo e chaminé.⁽²⁾

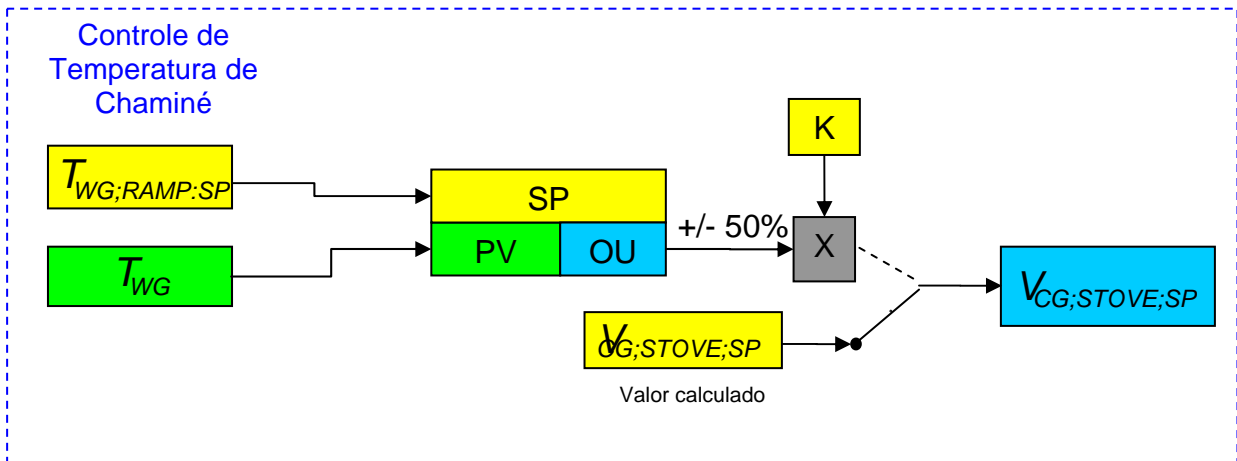


Figura 3. Diagrama de blocos da malha de controle da temperatura de chaminé.⁽¹⁾

Atingindo a Temperatura de Domo

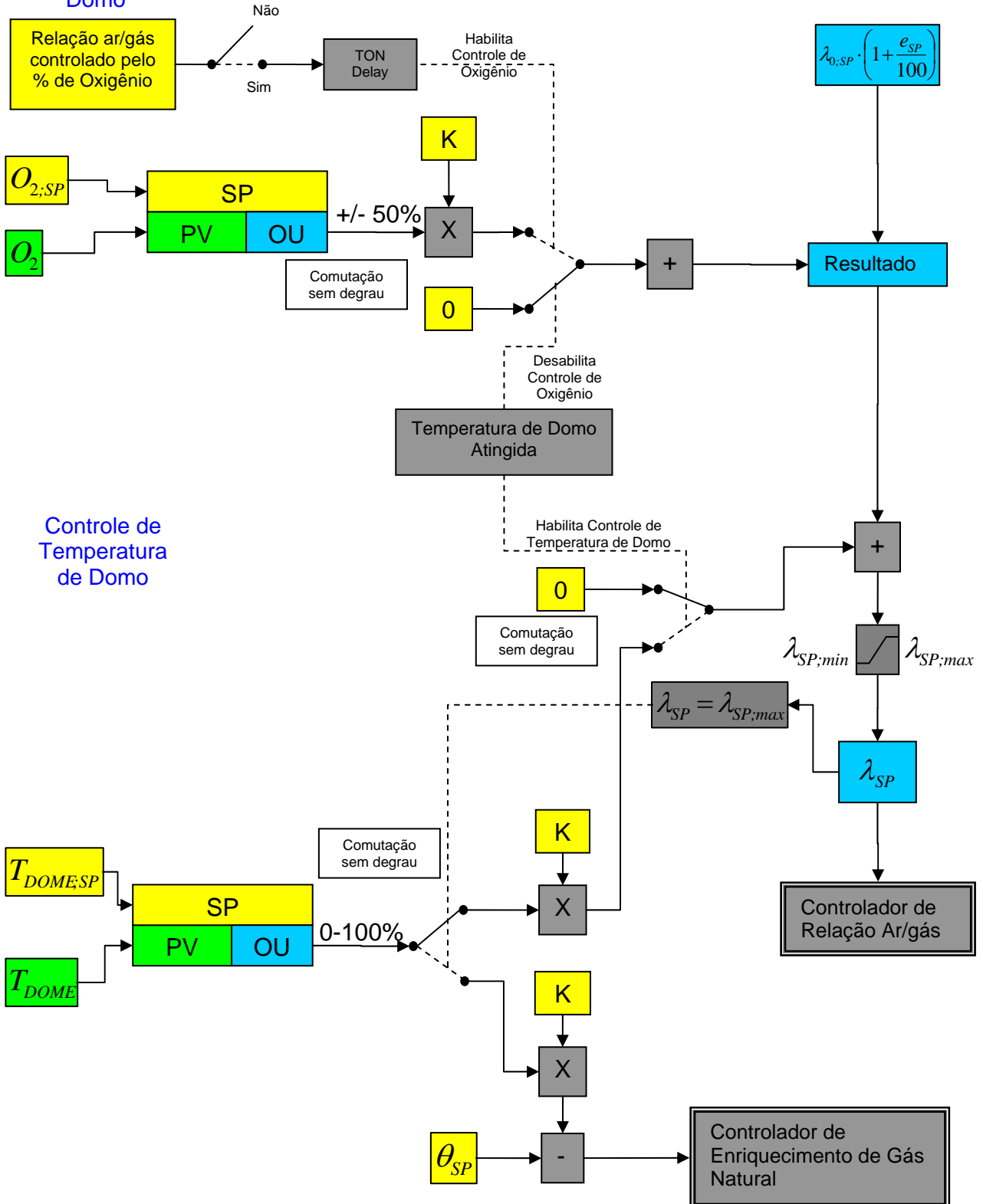


Figura 4. Diagrama de blocos da malha de controle da temperatura de domo.⁽¹⁾

4 DISCUSSÃO

Pelo fato do desenvolvimento deste trabalho ter sido realizado durante a fase de projeto e montagem dos altos fornos da ThyssenKrupp CSA, não temos base comparativa anterior à sua implementação, porém realizamos uma análise de desempenho dos equipamentos para observarmos a efetividade do controle. Desta forma foi utilizado como base de dados comparativa, o comportamento esperado, assim como o comportamento de regeneradores de outras empresas siderúrgicas no Brasil e Alemanha. Outro fator importante para o desenvolvimento foi a experiência profissional das equipes de operação e manutenção dos altos fornos da ThyssenKrupp CSA.

Após a sintonia de alguns parâmetros operacionais e de características físico-químicas dos gases envolvidos na combustão, obtivemos o resultado esperado em relação ao controle dos regeneradores. O modelo mostrou-se bastante assertivo.

O modelo prevê a utilização da eficiência dos regeneradores (η) como parâmetro na equação:

$$\dot{Q}_{SP} = E_{STOVE} \cdot \frac{T_{DOME;INP}}{T_{DOME;INP} - T_{WG;INP}} \cdot \frac{1}{t_{On\ Gas}} \cdot \frac{1}{\eta}$$

Até o presente momento não estamos utilizando este parâmetro, e estamos desenvolvendo um modelo para determinação do mesmo e sua utilização futura.

5 CONCLUSÃO

Através do gráfico mostrado na Figura 2, nota-se um comportamento estável dos controles de temperatura de domo e chaminé, tendo nestes primeiros 10 meses de operação mostrado um resultado bastante satisfatório. O gráfico mostrado foi extraído do sistema de automação dos altos fornos da ThyssenKrupp CSA, sendo o mesmo, o comportamento real de operação dos mesmos.

Agradecimentos

Gostaria de registrar aqui os agradecimentos às pessoas que colaboraram com o desenvolvimento deste projeto: ao Sr. Diretor José Tavares Marins, que fomentou e apoiou tecnicamente no desenvolvimento deste trabalho; à toda a equipe de operação e engenharia de processo, os quais contribuíram com experiência operacional e conhecimentos valiosos; à equipe de manutenção e engenharia; às empresas Paul Wurth e Exor, as quais também contribuíram na implementação do sistema. Alguns profissionais que estiveram envolvidos mais diretamente: Thomas Kuckertz, Tiago Campelo Medeiros, Sandro Luis de Moura Purcino, Sandro Lopes Alberto, Gustavo Ramos Pereira, Newton Sgnolf.

REFERÊNCIAS

- 1 Descritivo funcional do sistema de controle dos regeneradores da ThyssenKrupp CSA.
- 2 Sistema Supervisório ABB Industrial IT 800xA da ThyssenKrupp CSA.