

LÓGICA DE CONTROLE UTILIZANDO TRÊS COMBUSTÍVEIS NA ESTAÇÃO DE MISTURA DO FORNO DE REAQUECIMENTO DA LAMINAÇÃO DE PERFIS GERDAU AÇOMINAS ¹

José Geraldo da Silva Moreira²

Otávio Ferreira Machado³

Roberto Carneiro da Silva⁴

Cláudio Mendes de Oliveira⁵

Mario Teruo Enju⁶

Marco Aurélio de Freitas⁷

Resumo

A operação adequada dos fornos de reaquecimento pode ser medida através de sua produtividade, seu consumo específico e seu rendimento metálico. A qualidade da combustão dos gases no interior do forno é de fundamental importância para que esses requisitos sejam atingidos. Um dos principais fatores que garantem a qualidade da combustão é o controle das variáveis do gás fornecido para a queima. No forno de reaquecimento da Laminação de Perfis Gerdau Açominas, todo o controle desse gás é realizado na estação misturadora de gases. Neste trabalho, serão apresentadas as alterações efetuadas nas malhas de controle da estação misturadora, realizadas com o objetivo de incluir o Gás Natural na mistura, bem como solucionar as dificuldades existentes na topologia inicial proposta pelo fabricante.

Palavras-chave: Forno de reaquecimento; Estação de mistura; Gases; Automação.

CONTROL LOGIC USING THREE COMBUSTIBLE ON THE REHEATING FURNACE MIX STATION OF GERDAU AÇOMINAS PROFILES MILL

Abstract

The proper operation of reheating furnaces may be measured by productivity, specific fuel consumption and metallic efficiency. The combustion quality of gases burned into the furnace is extremely important for reaching these requirements. One of the most important items for guarantee the combustion quality is the parameters control of the gas injected and burned into the furnace. On the reheating furnace of Gerdau Açominas Profiles Mill, this control is realized on the mix station. On this paper, will be presented the modification on control loop of mixed station implemented for including the natural gas on the mix, as well solve existing problems on the initial topology proposed by the manufacturer.

Key words: Reheating furnace; Mix station; Gas; Automation.

¹ *Contribuição técnica ao XI Seminário de Automação de Processos, 3 a 5 de outubro, Porto Alegre-RS*

² *Engenheiro de Manutenção Sr - Gerdau Açominas*

³ *Engenheiro Trainee – Gerdau Açominas*

⁴ *Técnico de Inspeção Elétrica – Gerdau Açominas*

⁵ *Facilitador de Produção - Gerdau Açominas*

⁶ *Gerente de Operações – AGI Sistemas de Automação - Combustol*

⁷ *Coordenador de processos – Combustol*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Visão Geral do Forno de Reaquecimento da Laminação de Perfis

A estação misturadora de gases tem como principal objetivo fornecer gás combustível, com um PCI específico e sob pressão controlada para o forno de reaquecimento de blocos da laminação de perfis estruturais da Gerdau Açominas, seu único cliente. Os critérios de desempenho necessários para as malhas de controle devem ser especificados com base nas solicitações desse “cliente”.

As partes no interior do forno são classificadas em zonas de controle. As zonas 1, 2 e 3 são compostas por queimadores de grande potência colocados nas laterais do forno, denominados queimadores pulsantes. Todas as válvulas dessas zonas são do tipo *on-off*, ou seja, não permitem aberturas intermediárias, ficando totalmente fechadas ou totalmente abertas. O controle da vazão é feito baseado na relação do tempo de abertura da válvula sobre um determinado tempo de ciclagem, o qual foi inicialmente determinado como 60 segundos. Por exemplo, se desejarmos um volume de 50% do volume máximo do queimador, a válvula permaneceria aberta por 30 segundos e fechada nos 30 segundos restantes, após o que o ciclo se reiniciaria. Essas zonas são as responsáveis pelas principais dificuldades de controle, uma vez que geram distúrbios rápidos e de grande intensidade na pressão do gás misto. As zonas 4, 5 e 6 são baseadas no controle contínuo convencional, onde o volume a ser injetado no forno é controlado por meio da alteração da abertura de válvulas controladoras de vazão. A figura abaixo mostra a disposição dos queimadores no forno.

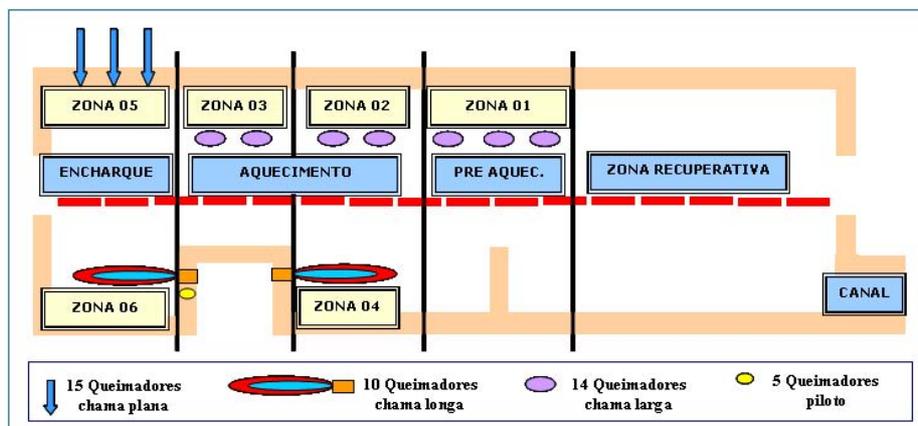


Figura 1. Diagrama esquemático do Forno de Reaquecimento.

1.2 A Estação de Mistura da Laminação de Perfis Gerdau Açominas

A figura 2 mostra uma tela atual do sistema supervisorio da estação misturadora. Esta é utilizada como base para a identificação dos principais equipamentos mecânicos do sistema e para uma rápida descrição das suas funções. A instrumentação será descrita posteriormente.

Chegam atualmente à estação três linhas trazendo gás de coqueria (COG), gás de alto-forno (BFG) e Gás Natural (GN). As linhas de gás de coqueria e alto-forno são isoladas das linhas principais dos respectivos gases por meio de válvulas V (selos d'água), as quais são abertas ou fechadas manualmente pelo operador do forno. A linha de gás natural é isolada da linha principal por meio de um sistema “gás key”, composto de bloqueio duplo com *vent* intermediário. Este sistema conta também com linhas auxiliares para a realização de testes de estanqueidade.

Após as válvulas de bloqueio estão localizadas as válvulas controladoras, responsáveis pela regulação das vazões de cada gás. Posteriormente, os gases são enviados a um misturador tangencial, produzindo o gás misto, que segue para o forno de aquecimento. O isolamento entre a linha de saída da estação de mistura e a linha do gás a ser fornecido ao forno é realizado por uma válvula V e um sistema *gas-key*.

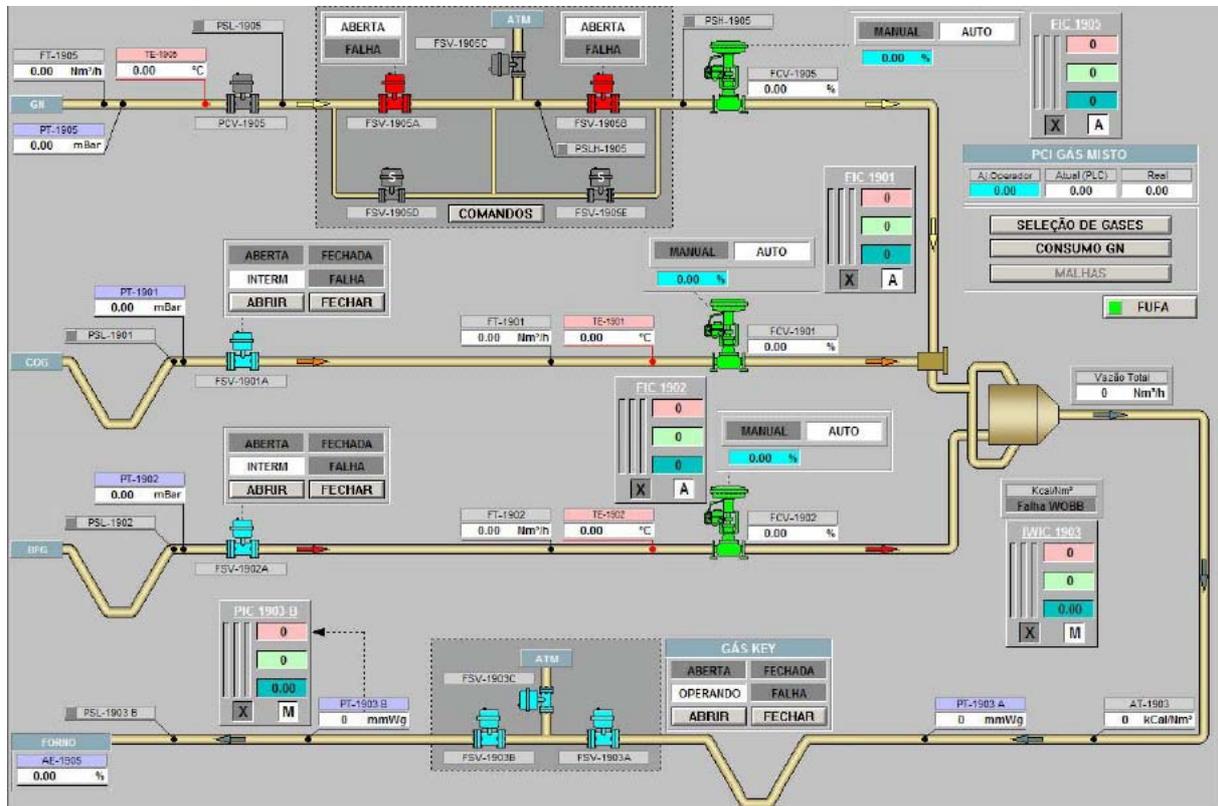


Figura 2. Diagrama Básico da Estação de Mistura Atual.

1.3 Histórico

O projeto original da estação misturadora contemplava a utilização apenas dos gases de coque e alto-forno.

O sistema de controle proposto pelo fabricante Stein Heurtey baseava-se em uma malha do tipo duplo limites cruzados. Apesar de conseguir manter a relação entre os gases (e, conseqüentemente, o PCI do gás misto) dentro de uma faixa mais estreita, impedindo o excesso de qualquer um dos gases, a topologia se mostrou incapaz de atender rapidamente às solicitações de carga do forno. A lentidão de resposta se deve ao atraso nas atuações nas válvulas de um determinado gás, que só é permitida pela malha quando a vazão do outro gás atinge um valor que permita manter a relação entre os gases dentro de uma faixa pré-determinada.

Visando corrigir essas deficiências, o projeto original foi então alterado pela própria Stein Heurtey, conforme descreveremos a seguir.

1.3.1 Malha de controle da estação de mistura anterior

Como o objetivo da alteração feita pela Stein Heurtey, mostrada na figura 3, abaixo, era atender rapidamente às alterações bruscas de pressão geradas pelos queimadores pulsantes, foi implementado um controle antecipatório (*feedforward*), procurando, antes que a pressão da linha principal varie, fazer um pré-posicionamento das válvulas de COG

e BFG em função da abertura das válvulas *shut-off* dos queimadores pulsantes e das válvulas controladoras dos queimadores contínuos.

O sistema de controle antecipatório parte do pressuposto de que a abertura das válvulas de COG e BFG deve ser proporcional à quantidade de combustível que entra no forno, a qual por sua vez é função da quantidade de queimadores pulsantes (zonas 1, 2 e 3) abertos e da vazão que passa nas zonas de controle proporcional (zonas 4, 5 e 6).

Para formalizar este conceito foi definido que a maior potência possível de ser admitida no forno seria obtida pela somatória das vazões máximas de todos os queimadores. Com base nisto foi atribuído um peso a cada queimador em função de sua vazão máxima.

A soma ponderada dos queimadores pulsantes abertos e das vazões dos queimadores contínuos determinaria a vazão de gás misto desejada em um dado instante. Multiplicando-se este sinal pelos percentuais teóricos necessários para obtenção do índice de Wobbe desejado, obtemos os sinais de pré-posicionamento das válvulas de BFG e COG.

O sistema de pré-posicionamento faz com que a válvula de entrada de COG responda rapidamente às variações nas válvulas dos queimadores, antes mesmo que a pressão da linha varie. No entanto, ele não garante que a pressão seja controlada precisamente no valor desejado pelo operador. Para que isto fosse possível, implementou-se o controlador de pressão da linha principal. Esse controlador mede o valor da pressão na tubulação principal e altera sua saída em função do erro encontrado. O controlador tem então seu sinal de saída alterado para uma faixa de -100% a +100%.

A saída convertida é então adicionada ao sinal de vazão percentual instantânea admitida no forno, fazendo com que o pré-posicionamento da válvula seja alterado para mais ou para menos visando levar a pressão da linha ao valor de *set-point* desejado.

O pré-posicionamento da válvula de BFG permite uma resposta mais rápida às variações de pressão na linha com uma relação próxima da desejada, mas não garante a precisão da relação entre as vazões.

Para melhorar esta precisão foi utilizado então um controlador de vazão de BFG. O *set-point* remoto deste controlador é determinado multiplicando a vazão de COG pela relação BFG/COG definida pela malha de correção do índice de Wobbe. A saída do controlador de vazão de BFG é então convertida para uma faixa de -100% a +100% e adicionada ao sinal de pré-posicionamento da válvula de BFG, fazendo com que o mesmo seja alterado para mais ou para menos visando levar a vazão de gás ao valor de *set-point* desejado.

A relação teórica entre o COG e o BFG é determinada em função do índice de Wobbe do gás misto desejado, do PCI e da densidade de cada gás informados via sistema supervisor. Para que se tenha uma relação mais precisa é utilizado um wobbímetro, o qual faz a análise contínua do gás misto enviado para o forno.

Para o ajuste fino desta relação utiliza-se o controlador de índice de Wobbe, o qual tem então sua saída ajustada para uma faixa de 0,5 a 1,5. A saída convertida é então multiplicada pelo sinal de relação teórica entre os gases, fazendo com que a relação seja alterada para mais ou para menos visando levar o índice de Wobbe ao valor de *set-point* desejado. A relação corrigida é multiplicada pela vazão de COG para determinação da vazão de BFG.

Apesar de haver melhorado a resposta da estação às variações bruscas de pressão geradas pelas zonas pulsantes, esta configuração apresentava-se altamente instável, levando a vários desarmes no forno de reaquecimento.

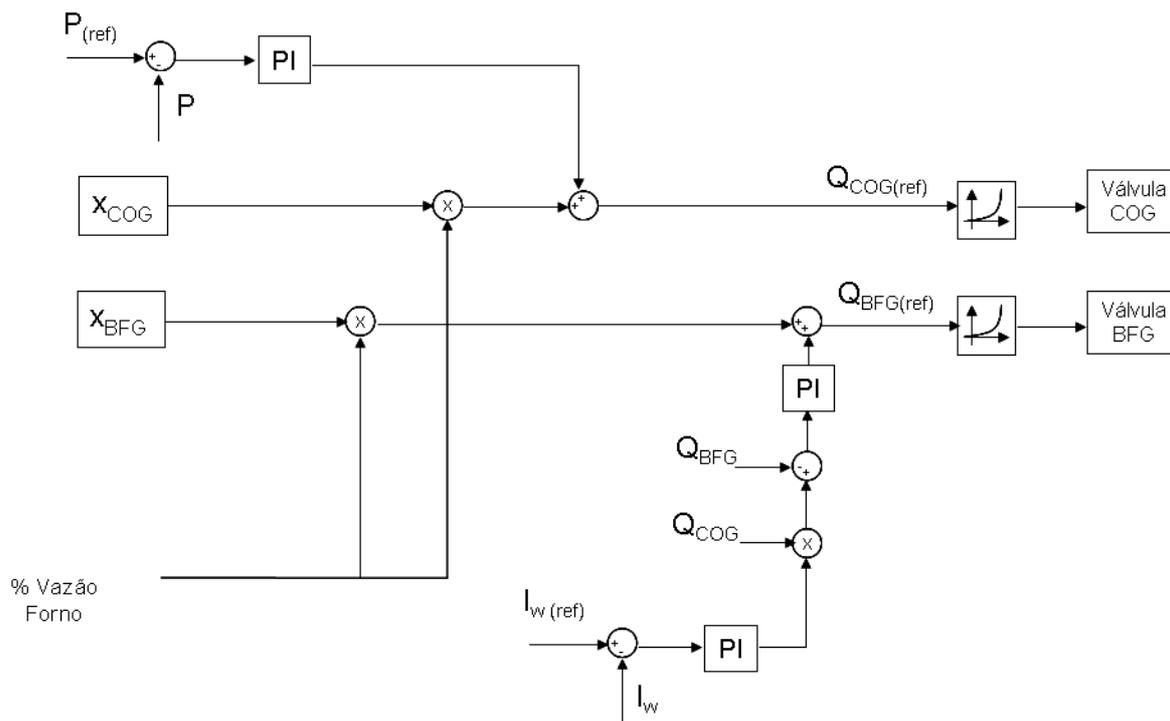


Figura 3. Malha de Controle Proposta pelo fabricante.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Avaliação da Malha Anterior

Após um estudo detalhado, alguns problemas existentes na malha de controle implantada pela Stein Heurtey foram identificados, conforme enumerado abaixo:

- Grande acoplamento entre as malhas de controle de pressão e índice de Wobbe devido à atuação invertida nos combustíveis – Como o gás de coqueria tem um índice de Wobbe de aproximadamente 7430 kcal/Nm^3 e o gás de alto-forno tem um índice de Wobbe de aproximadamente 770 kcal/Nm^3 , podemos perceber que ao se tentar corrigir o índice de Wobbe utilizando a vazão de BFG, é gerada uma grande perturbação na pressão do gás e ao se tentar corrigir a pressão utilizando a vazão de COG é gerada uma grande perturbação no índice de Wobbe. Esta situação, no entanto, não poderia ser simplesmente invertida, uma vez que é permitida a operação do forno de aquecimento com COG puro e nesta situação também é necessário que se faça o controle de pressão da linha.
- Sensibilidade às variações na pressão da linha dos gases na entrada da misturadora – Como o controle das vazões é realizado em malha aberta, as alterações na pressão dos gases à montante da misturadora só seriam percebidas e corrigidas após o seu efeito ser percebido pelo controlador de pressão de gás misto.
- Necessidade de ajuste da curva de vazão das válvulas para corrigir as não linearidades das mesmas – Como a vazão desejada dos combustíveis é utilizada para o posicionamento direto das válvulas, é necessário que se utilize uma curva vazão/abertura das válvulas para fazer o pré-posicionamento das mesmas.

- Acoplamento entre os controles de pressão e Wobbe - Devido ao fato do controle de pressão ser realizado pela atuação na vazão de apenas um combustível, a relação entre os dois combustíveis e consequentemente o índice de Wobbe são afetados. De forma semelhante, a atuação do Wobbe em apenas um combustível altera a soma das vazões o que por sua vez altera a pressão.

2.2 Soluções Propostas para a Malha Anterior

Para solucionar os problemas relacionados ao acoplamento entre os controles de pressão e Índice de Wobbe, optou-se por alterar a forma de atuação dos controladores da seguinte forma:

- O controlador de pressão deveria atuar simultaneamente nos dois combustíveis, elevando ou reduzindo a vazão dos mesmos sem que se alterasse a relação entre eles.
- O controlador de índice de Wobbe deveria atuar simultaneamente nos dois combustíveis aumentando a vazão de um deles e reduzindo a vazão do outro sem que se alterasse a soma das duas vazões.

Para se corrigir os problemas de não linearidade das curvas das válvulas e sensibilidade à pressão das linhas de gases, optou-se por utilizar um controlador de vazão para cada combustível.

Estas medidas permitiram também que todo o controle fosse feito baseado nas vazões de combustíveis, simplificando os cálculos e os ajustes das malhas.

2.3 Alterações para Inclusão de Gás Natural

Com a inclusão de gás natural como combustível a ser utilizado na estação de mistura, tornou-se necessária a alteração da malha de controle. Nesta modificação deveriam ser contempladas as várias formas possíveis de se obter a mistura dos 3 gases. Como o dimensionamento dos queimadores do forno não permite que se queimem gases com PCI superior ao PCI do gás COG, não é possível escolher a porcentagem do gás pobre, o BFG. Chega-se, portanto, a três modos básicos de operação: % GN fixa e especificada pelo operador (modo 1), % COG fixa e especificada pelo operador (modo 2) e operação com COG puro (modo 3).

2.4 Tratamento Matemático

A determinação das vazões teóricas dos gases na estação de mistura segue o sistema de equações lineares apresentado abaixo. Pode ser observado que existem infinitas combinações que geram um PCI especificado de gás misto, visto que existem 2 equações e 3 incógnitas.

$$PCI_{GM} = x_{COG}PCI_{COG} + x_{BFG}PCI_{BFG} + x_{GN}PCI_{GN}$$

$$x_{COG} + x_{BFG} + x_{GN} = 100\%$$

A existência de um conjunto finito de soluções presume a especificação de um dos gases. A porcentagem máxima permitida é baseada nas vazões máximas dos outros dois gases, de forma a inibir misturas que gerem valores de PCI do gás misto acima do PCI máximo de trabalho. Os gases não especificados são definidos

automaticamente pelo sistema de equações. Abaixo são mostradas as fórmulas utilizadas nos modos GN fixo e COG fixo.

Modo GN fixo

x_{GN} = percentual de gás natural definida pelo operador entre 0 e 19 %

$$x_{COG} = \frac{(PCI_{GM} - PCI_{BFG})}{(PCI_{COG} - PCI_{BFG})} - x_{GN} \times \frac{(PCI_{GN} - PCI_{BFG})}{(PCI_{COG} - PCI_{BFG})}$$

$$x_{BFG} = \frac{(PCI_{GM} - PCI_{COG})}{(PCI_{BFG} - PCI_{COG})} - x_{GN} \times \frac{(PCI_{GN} - PCI_{COG})}{(PCI_{BFG} - PCI_{COG})}$$

Modo COG fixo

x_{COG} = percentual de gás de coqueria definida pelo operador entre 0 e 43 %

$$x_{GN} = \frac{(PCI_{GM} - PCI_{BFG})}{(PCI_{GN} - PCI_{BFG})} - x_{COG} \times \frac{(PCI_{COG} - PCI_{BFG})}{(PCI_{BFG} - PCI_{BFG})}$$

$$x_{BFG} = \frac{(PCI_{GM} - PCI_{GN})}{(PCI_{BFG} - PCI_{GN})} - x_{COG} \times \frac{(PCI_{COG} - PCI_{GN})}{(PCI_{BFG} - PCI_{GN})}$$

A transição entre os estados de operação deve ser realizada segundo uma rampa, tanto para a porcentagem do gás fixo quanto para o PCI, de modo a evitar grandes perturbações no sistema. A figura abaixo exemplifica uma transição do modo 1 (16 % de GN) para o modo 3, que é considerado como um caso especial do modo 1, cuja % GN especificada é zero e o PCI do gás misto é igual ao PCI do COG.

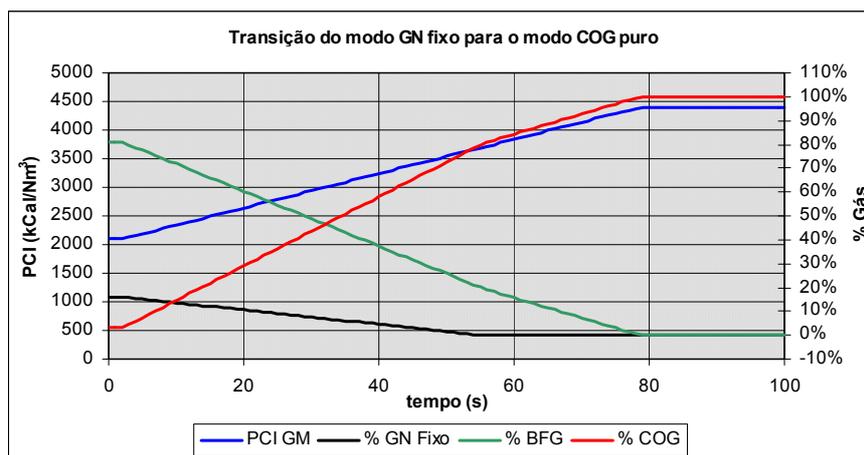


Figura 4. Transição do modo % GN especificada para o modo COG puro

2.5 Lógica Implementada

De maneira geral, o sistema de controle caracteriza-se por malhas de controle da pressão e do índice de Wobbe em paralelo, garantindo respostas rápidas e independentes para essas variáveis, em cascata com malhas de vazão dos gases

COG, BFG e GN, objetivando atender eficientemente as solicitações das malhas mais externas. A figura abaixo mostra a topologia do sistema descrito.

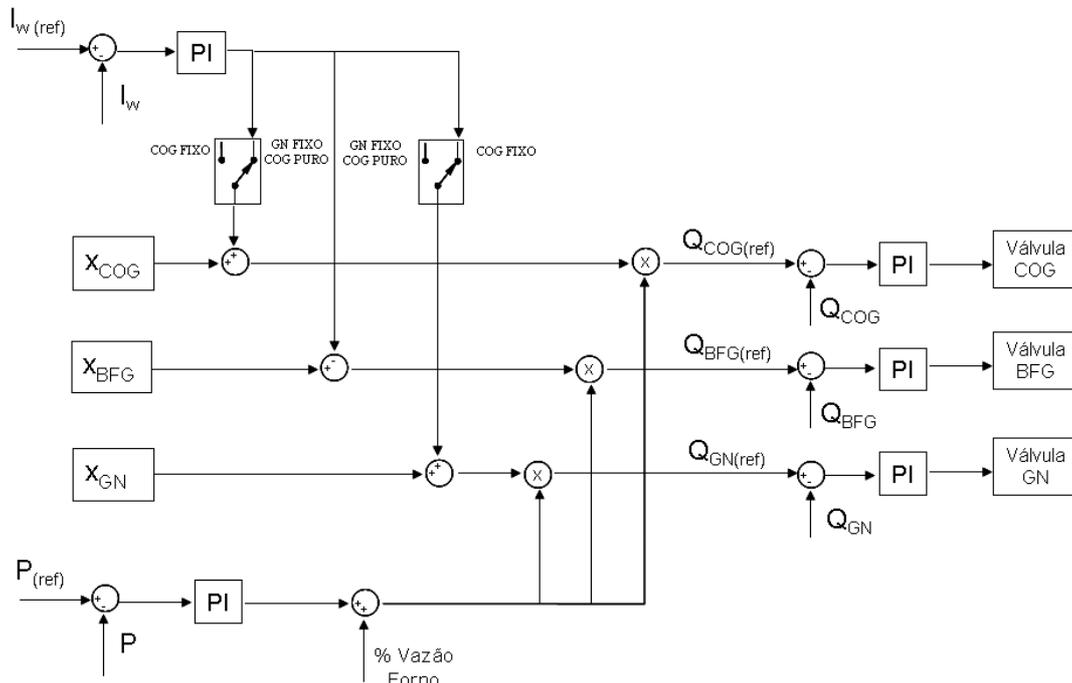


Figura 5. Malhas de controle da estação de mistura representadas em diagrama de blocos

As oscilações na pressão do gás misto são causadas principalmente pelo desequilíbrio entre as vazões de entrada e saída da estação misturadora. Conforme explicado anteriormente, essas oscilações são reduzidas com a antecipação do controle baseado na soma das vazões dos queimadores ligados em relação à vazão total admissível no forno, indicada no diagrama pela variável *%VazãoForno*. O ajuste fino é realizado pelo controlador de pressão. Observa-se que a sua atuação é totalmente desacoplada do controle de índice de Wobbe, uma vez que a elevação ou diminuição acontece em todos os combustíveis e não altera a relação entre eles. Esta filosofia também permite o controle de pressão, caso se utilize o modo COG puro.

Paralelamente ao controle de pressão, o controle do índice de Wobbe garante o fornecimento controlado de energia para o forno. A saída desse controlador irá corrigir as porcentagens pré-calculadas dos gases cujas porcentagens são definidas indiretamente pelos cálculos de PCI. A atuação deste controlador é feita somando-se valores aos percentuais dos gases ricos (X_{GN} e X_{COG}) e subtraindo-se estes valores do percentual de BFG (X_{BFG}), garantindo-se desta forma que a soma seja sempre 100% e a vazão total seja mantida. Desta forma o controle do índice de Wobbe também se torna desacoplado do controle de pressão.

A multiplicação das porcentagens corrigidas pelo controlador do índice de Wobbe pela vazão total de gás misto solicitada pelo controle antecipatório e corrigida pelo controlador de pressão fornece a vazão necessária dos gases de entrada. Para garantir que essas vazões sejam perfeitamente seguidas, o posicionamento direto das válvulas foi substituído por malhas individuais de vazão, criadas com o objetivo de zerar o erro de regime permanente e melhorar a resposta dinâmica do sistema. Com a inclusão dos controladores de vazão, torna-se desnecessário o levantamento das curvas de vazão das válvulas e reduz-se a

sensibilidade do sistema às variações de pressão nas linhas dos gases que chegam à misturadora.

2.6 Arquitetura

De maneira geral, os sistemas de controle e automação de processos podem ser caracterizados por níveis funcionais, desde os instrumentos de campo até os grandes sistemas de gerenciamento. Para o forno de reaquecimento, descrevem-se três níveis: equipamentos de campo (nível 0), PLCs e estações de operação (nível 1) e um sistema de modelamento matemático (nível 2). A figura 6 mostra a topologia do sistema.

Para a automação do forno de reaquecimento são utilizados dois PLCs de fabricação da Allen-Bradley, família ControlLogix: o *Heating*, responsável pelo controle dos processos que envolvem de maneira direta ou indireta o aquecimento, e o *Handling*, que trata dos processos de movimentação da carga na região do forno. A comunicação entre as estações remotas (nível 0) é feita por meio de uma rede ControlNet. A comunicação nos níveis 1 e 2 ocorre através de uma rede Ethernet.

O sistema de modelamento matemático, denominado H.O.T. (*Heating Operator Terminal*), funciona em um microcomputador dedicado localizado na cabine de controle do forno e é responsável pela otimização de todo o processo de aquecimento.

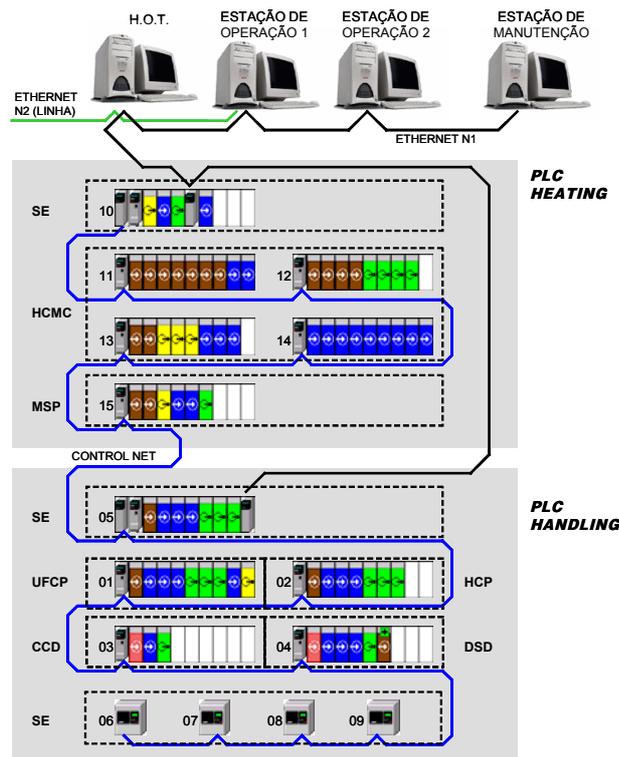


Figura 6. Arquitetura do Sistema de Automação do Forno de Reaquecimento

2.7 Estratégia de Operação

A operação da estação de mistura baseia-se na tela principal (figura 2), que indica os dados de processo (vazões, pressão e temperatura dos gases), as condições de segurança e os estados das chaves de gás.

A seleção e o comando para as transições entre os diversos tipos de mistura são realizados através de uma tela *pop-up* de seleção de gases, que também permite a alteração de todos os parâmetros da mistura. A figura abaixo mostra a interface com o usuário.



Figura 7. Tela de seleção de gases da estação de mistura

No quadro (1) permite-se a seleção do gás rico que terá sua porcentagem fixa, COG ou GN. A seleção habilita a digitação do valor desejado no quadro (2). Após a entrada desse valor e o acionamento da tecla confirma, os valores são corrigidos em rampa e exibidos na coluna (3).

No quadro (4) o operador pode selecionar a condição de COG puro. Quando esta opção é selecionada, automaticamente o modo GN fixo é selecionado, sendo seu percentual ajustado para zero e o PCI do gás misto para um valor igual ao PCI do COG.

Devido à possibilidade de ocorrências de problemas no medidor de índice de Wobbe, permite-se, no quadro (5), que a variável de processo seja calculada a partir das vazões reais, garantindo-se desta forma que, mesmo com o instrumento inoperante, a relação entre os gases não permanecerá fora da faixa de operação especificada.

No projeto original do forno, a operação determinava o PCI desejado para o gás misto e o índice de Wobbe era calculado a partir deste. Como há várias misturas possíveis para um mesmo PCI, obtém-se, para cada uma, um valor diferente do índice de Wobbe. Foi então disponibilizada no quadro (6) a possibilidade de se calcular o índice de Wobbe a partir do PCI ou do operador fixar o índice de Wobbe, digitando o valor desejado. Esta funcionalidade é necessária, pois, devido às zonas pulsantes, a referência para o controlador de pressão também é alterada em função da referência do controlador do índice de Wobbe. Assim, fixando o índice de Wobbe, a operação pode ajustar melhor a referência da pressão da linha sem a necessidade de cálculos adicionais.

3 RESULTADOS OBTIDOS/ESPERADOS

Com a implementação do novo sistema de controle, houve uma redução no número de desarmes no forno por oscilações nas variáveis relacionadas ao controle dos combustíveis da estação de mistura de gases, aumentando a segurança operacional e o índice de disponibilidade do equipamento.

Como consequência da maior estabilidade na estação misturadora, houve uma melhoria em praticamente todos os controles relacionados à combustão,

incluindo-se os controles de relação ar/gás e, como consequência, os controles de temperatura das zonas.

O aumento das possibilidades de mistura devido à utilização dos 3 gases permite uma maior flexibilidade na utilização dos combustíveis disponíveis na empresa, reduzindo, conseqüentemente, a vulnerabilidade do equipamento aos combustíveis convencionais (COG e BFG). Em condições normais de operação, são utilizados os três gases na mistura. Em condições de parada da planta produtora de COG (Coqueria), adota-se uma mistura de GN e BFG. Em casos de parada da planta produtora de BFG (Alto-Forno), existe a possibilidade de injeção de N₂ na linha desse gás, permitindo a sua mistura tanto com COG quanto com GN. Nesse caso, a utilização de GN na mistura permite a disponibilização de COG para outras plantas que não estão habilitadas a consumir GN.

4 CONCLUSÃO

A estratégia adotada mostrou-se perfeitamente viável para as aplicações em fornos com queimadores proporcionais ou queimadores pulsantes, já que é garantida a velocidade de resposta e a estabilidade do sistema quando os controladores estão corretamente sintonizados. A utilização do gás natural no Forno de Reaquecimento permite uma diversificação na matriz energética da usina e reduz a vulnerabilidade às paradas das plantas produtoras de gases siderúrgicos.

A melhoria da qualidade do gás fornecido para o forno abre portas para uma melhor operação dos fornos de reaquecimento, com ganhos de produtividade e redução no consumo específico.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Descritivo Funcional do Forno de Reaquecimento da Laminação de Perfis - Documento interno, Gerdau Açominas
- 2 Descritivo Funcional do Sistema de Gás Natural do Forno de Reaquecimento da Laminação de Perfis, Documento interno, Gerdau Açominas.