

DESENVOLVIMENTO DA MALHA DE CONTROLE DE MOAGEM E DOSAGEM DE CARVÃO PULVERIZADO DO PCI DA CSN¹

Ricardo Sebastião Nadur Motta²
Sandro Lopes Alberto³
Alcides José de Lucena Silva⁴
Ramon Marques Abrita⁵

Resumo

O sistema de injeção de carvão pulverizado da CSN possui duas moagens com capacidade nominal de 66 t/h de carvão bruto cada. Cada moinho gera cerca de 60 t/h de carvão pulverizado com no máximo 2,2% de umidade. Cada moagem possui dois transportadores tipo corrente que alimentam o moinho proporcionando a mistura de carvões alto e baixo voláteis visando maiores taxas de substituição carvão pulverizado/coque. As moagens por sua vez, podem abastecer alternadamente dois silos de carvão pulverizado com 1000 t de capacidade cada para alimentar uma estação de injeção com capacidade de 40 t/h para o Alto Forno 2 e duas estações de injeção de 40 t/h cada, para as lanças ímpares e pares do Alto Forno 3. Este trabalho descreve as implementações no controle da taxa de moagem e dosagem de carvões nos moinhos do PCI da CSN. Foi implantado um ajuste fino na malha de controle original, baseado no decréscimo do peso dos silos de carvão bruto no tempo. Esta realimentação atua na de velocidade do acionamento dos transportadores tipo corrente de retomada dos silos de carvão bruto. A análise em tempo real da comparação entre taxa de moagem e dosagem pedidas pelo operador e as taxas de retomada dos silos de carvão bruto, proporcionou estratégias mais avançadas para o controle das plantas de moagem de carvão. Houve também ações decorrentes na lógica de controle, tais como: disparo dos canhões de ar e aumento temporário da velocidade do transportador, visando deslocar o engaiolamento formado no silo de carvão bruto.

Palavras-chave: Moagem; Carvão pulverizado; PCI.

1 INTRODUÇÃO

O sistema de injeção de carvão pulverizado da CSN possui duas moagens com capacidade nominal de 66 t/h de carvão bruto cada. Cada moinho gera cerca de 60 t/h de carvão pulverizado com no máximo 22% de umidade. Cada moagem possui dois transportadores tipo corrente (TCC) que alimentam o moinho proporcionando a mistura de carvões alto (AV) e baixo volátil (BV). A Figura 1 ilustra os dois silos de carvão bruto alimentando alternadamente, através de transportadores tipo corrente (TCCs) os moinhos 1 e 2. As moagens por sua vez, podem abastecer alternadamente dois silos de carvão pulverizado com 1000 Ton de capacidade cada para alimentar uma estação de injeção com capacidade de 40 Ton/H para o Alto Forno 2 e duas estações de injeção de 40 Ton/H cada, para as lanças ímpares e pares do Alto Forno 3.

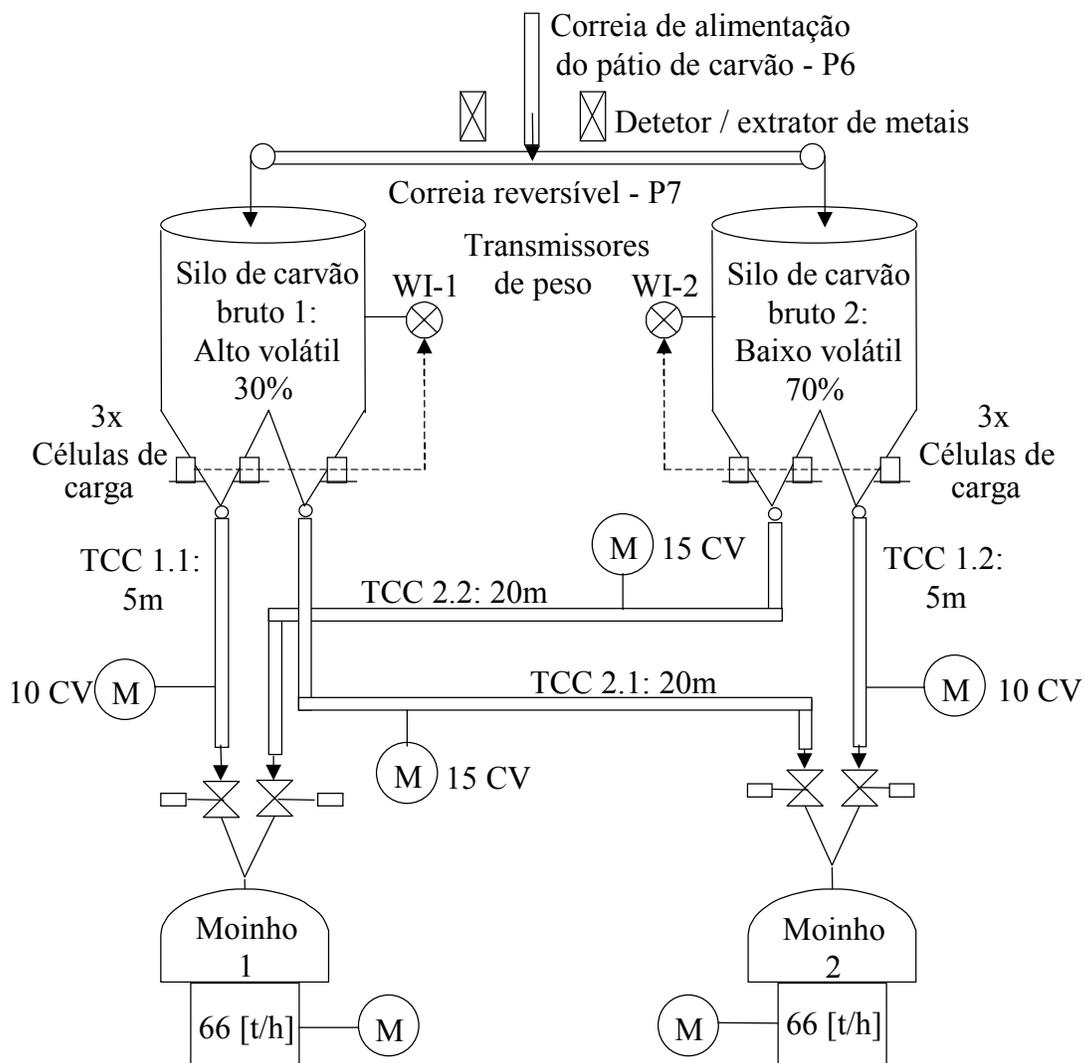


Figura 1. Visão geral da alimentação dos moinhos.

2 DESCRIÇÃO DA MALHA DE CONTROLE DE MOAGEM E DOSAGEM DE CARVÃO PULVERIZADO DO PCI DA CSN

A malha de controle de moagem do carvão foi originalmente projetada para decrementar a velocidade de alimentação através de um controlador PID baseado na pressão diferencial do moinho. Em condições normais de operação da planta, a pressão diferencial do moinho situa-se em torno de 25 [mbar] enquanto que o set-point é ajustado em 40 [mbar]. Assim, em condições normais de operação, a variável manipulada permanece normalmente em 100% e o fator de influência calculado adiante em (4), não altera a velocidade final dos transportadores corrente.

Em condições normais (sem entupimento do moinho), a malha de controle de velocidade dos transportadores corrente é função exclusivamente das taxas de moagem e dosagem percentual dos carvões AV e BV sendo ajustadas nas telas de controle pelo operador. Portanto, a malha de controle de moagem e dosagem de carvões não possui nenhum tipo de realimentação, funcionando como controle direto pelo operador, tal como ilustra a Figura 2.

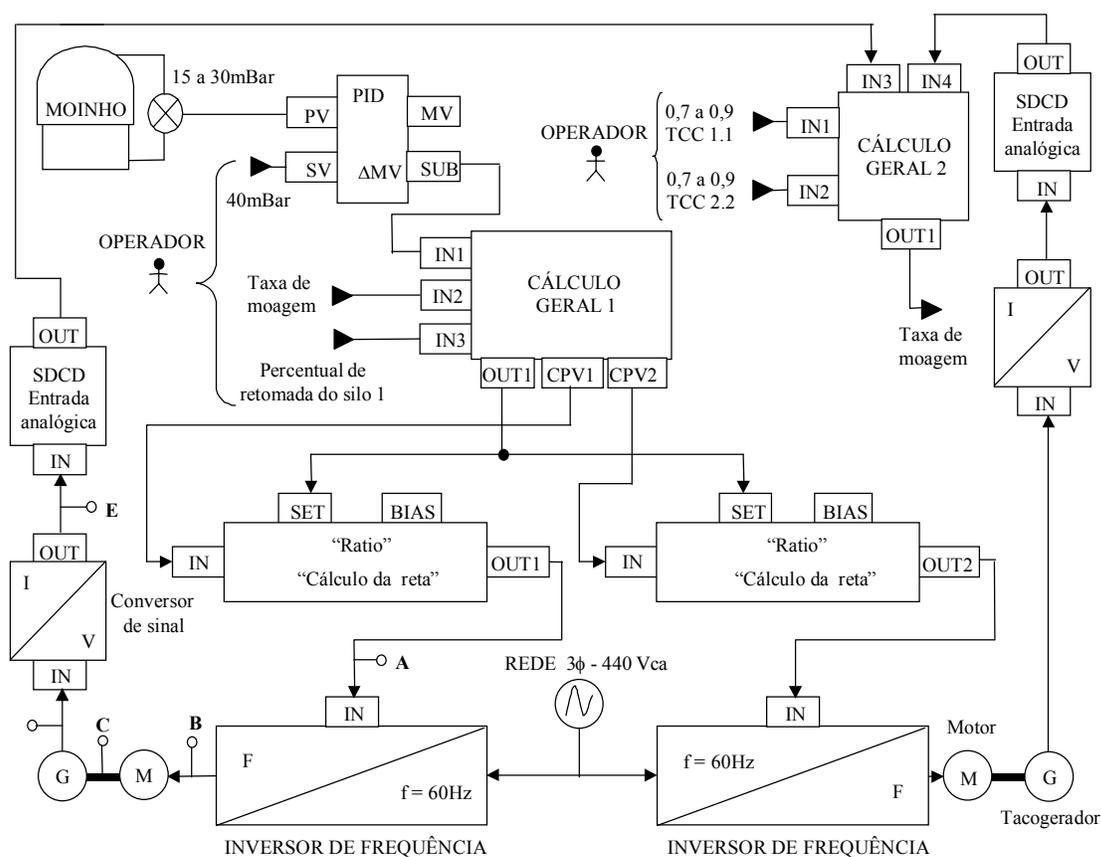


Figura 2. Malha de controle de moagem e dosagem de carvões.

2.1 Blocos de Cálculos e PID

O primeiro bloco é o controlador PID da pressão diferencial do moinho que fornece a variação da variável manipulada (ΔMV) pelo terminal (SUB) ao terminal (IN1) do cálculo 1. O terminal de saída (OUT1) do cálculo 1 fornece o fator de influência calculado em (3). O operador pode entrar com as taxas de moagem (IN2)

e dosagem (IN3) para cálculo de OUT2 e OUT3 conforme equações (4.1) e (4.2) mostrados adiante.

A equação (1) expressa o PID calculado pelo SDCD Yokogawa® [2] obtido em períodos fixos, de controle Δt :

$$\Delta MV_n = \frac{100}{PB} \left\{ \Delta E_n + \frac{\Delta t}{TI} E_n + \frac{TD}{\Delta t} \Delta(\Delta E_n) \right\} \quad (1)$$

onde:

ΔMV_n = variação da variável manipulada ocorrida no período de controle Δt ;

E_n = desvio no momento = $PV_n - SV_n$;

PV_n = variável de processo no momento n ;

SV_n = valor desejado de controle;

ΔE_n = variação do desvio;

Δt = período de controle do SDCD;

PB = valor proporcional;

TI = valor integral;

TD = valor derivativo.

2.2 Bloco “Ratio”

Os blocos “Ratios” ou blocos de equações do 1º grau, veja equação (2) adiante, coletam os resultados e fornecem as saídas de comando 4 à 20 [mA] para o inversor de frequência modular a velocidade do motor trifásico. Seu parâmetro “Bias” ou compensação, ou ainda, o termo **b** da equação $y = ax+b$, será usado no desenvolvimento como fator de compensação de velocidade vinculada ao decréscimo dos pesos dos silos de carvão bruto no tempo.

$$OUT = (IN \times SET) + BIAS \quad (2)$$

Onde:

IN = porcentagem de retomada obtida pela taxa e dosagem pedidos;

SET = fator de influência da pressão diferencial, veja equação (3);

BIAS = fator de compensação (originalmente = 0);

OUT 1/ OUT 2 = resultados das funções das equações de 1º grau a serem usada para controle dos inversores.

2.3 Faixas de Conversão e Funções de Transferências dos Blocos

A seguir, temos a figura 3 com as escalas das funções de transferência efetuadas pelos blocos da malha de controle e seus equipamentos integrados.

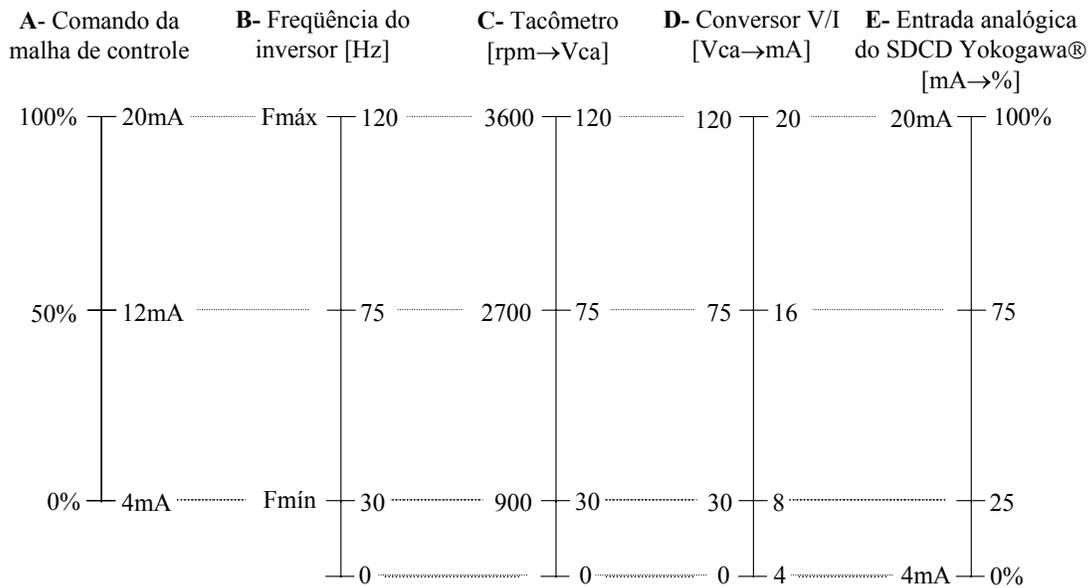


Figura 3. Escala das funções de transferência.

2.4 Inversores de Frequência

Foram instalados nos inversores de frequência indutâncias nos elos de corrente contínua para minimizar “Ripple” e reatores de linha entre a saída e o motor para evitar correntes harmônicas. Seu comando segue a escala B, onde $F_{máx} = 120$ [Hz] e $F_{mín} = 30$ [Hz]. A frequência mínima foi limitada em 30 [Hz] para evitar componentes contínuos e de baixa frequência nos motores, evitando sobrecargas.

2.5 Motores Elétricos Trifásicos

Os motores elétricos trifásicos são especiais para acionamentos por inversor. Possuem ventilação extra com alimentação de 60 [Hz], separada do motor garantindo uma refrigeração constante.

Para o transportador corrente de menor comprimento (5 metros) a potência do motor é de 10 [CV]. Já para o transportador corrente maior (20 metros) a potência do motor é de 15 [CV], conforme ilustra a figura 1.

2.6 Tacogeradores e Conversor de Sinal

Os motores elétricos acionados pelos inversores, possuem tacogeradores acoplados ao eixo. Sua função é fornecer um sinal de controle de realimentação para o acionamento. A escala C da figura 3 ilustra sua função de transferência típica. A relação entre a tensão gerada pelo tacogerador e a rotação do eixo do motor é linear, ou seja, sua tensão de saída em [Vca] é diretamente proporcional a rotação do eixo do motor em [rpm]. As variáveis de velocidade do eixo do motor provem dos conversores de tensão alternada dos tacogeradores em sinais 4 a 20 [mA] equivalentes.

Os tacogeradores medem a velocidade dos acionamentos segundo a escala C da figura 3. Os conversores de sinal convertem a tensão do tacogerador em corrente

4 a 20 [mA], segundo a escala D, para ser lida pela entrada analógica do SDCD. A velocidade é então mostrada percentualmente segundo a escala E. Todavia, este sinal não é utilizado para realimentação da malha de controle, ou seja, a malha de controle é direta e não é fechada.

3 SISTEMA DE PESAGEM DOS SILOS DE CARVÃO BRUTO

As células de carga fornecem os sinais para os transmissores de peso WI-1 e WI-2 calibrados numa escala de 0 a 1000 ton. O sistema possui uma precisão de medida < 1% de erro e linearidade 0,01%.

As moagens do PCI da CSN não possuem balanças integradoras tais como descritos no artigo técnico [1], sobre plantas de moagem de carvão pulverizado para fábricas de cimento. Neste caso o controle e integração das taxas de moagens são feitas com o sinal da balança integradora pesando o transportador corrente e corrigindo sua velocidade. O desenvolvimento deste trabalho só utilizou os sinais dos sistemas de pesagem dos silos de carvão bruto já existentes do projeto original.

4 FATOR DE INFLUÊNCIA

O valor de ΔMV_n calculado em (1) está ligado na variável de entrada (IN1) do bloco de cálculo que efetua o cálculo 1 do fator de influência. A saída OUT 1 fornece este valor normalmente em 1, mas pode variar de 0 a 2,0.

$$F = CPV = \frac{100\% - \Delta MV_n}{100\%} \quad (3)$$

Onde:

F = fator de influência;

$\Delta MV_n = 100\%$ a -100% .

5 CÁLCULO DAS TAXAS DE RETOMADA PARA OS TRANSPORTADORES TIPO CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DO MOINHO

O cálculo das taxas de retomada para os transportadores tipo corrente é realizado pelo bloco de cálculo 1, onde:

IN1 = variação da MV do controlador de pressão diferencial do moinho, obtido pela equação (1);

IN2 = taxa de moagem pedida pelo operador;

IN3 = percentual de retomada do silo 1 pedido pelo operador;

OUT1 = fator de influência da malha de pressão diferencial;

OUT2 = porcentagem de retomada para o TCC 1.1;

OUT3 = porcentagem de retomada para o TCC 2.2.

Exemplo:

Seja uma taxa de moagem pedida de 66 [t/h], capacidade do moinho, com taxa de retomada de 70% de carvão baixo volátil do silo 1, e 30% de carvão alto volátil do silo 2:

$$IN2 = 66 \text{ [t/h]} \quad IN3 = 70\%$$

$$CPV1 = IN2 \times IN3 = 66 \times 0,7 = 46,2 \text{ [t/h]} \quad (4.1)$$

$$CPV2 = IN2 \times (100 - IN3) = 66 \times 0,3 = 19,8 \quad [t/h] \quad (4.2)$$

Levando estes valores nos blocos “Ratio” obtem-se as taxas de retomada para cada transportador:

$$OUT1 = F \times CPV1 = 1 \times 46,2 = 46,2 \quad [t/h]$$

$$OUT2 = F \times CPV2 = 1 \times 19,8 = 19,8 \quad [t/h]$$

Onde o set do bloco “Ratio” é o fator de influência da pressão diferencial do moinho na velocidade final dos transportadores corrente, obtido em (3).

6 CÁLCULO DA TAXA DE MOAGEM A PARTIR DA VELOCIDADE DO TRANSPORTADOR CORRENTE

A taxa de moagem, **TG**, calculada pelo bloco de cálculo 2 é função dos sinais dos tacogeradores e da área sob a barra dos transportadores tipo corrente na porcentagem final da escala E, conforme ilustra a equação (5) a seguir:

$$TG = [(área TCC 1.1 \times velocidade TCC 1.1) + (área TCC 2.2 \times velocidade TCC 2.2)] \quad (5)$$

O cálculo 2 mostra o resultado da taxa de moagem obtida pela equação (5), onde:

IN1 = constante que simboliza a área da barra do TCC 1.1 sobre o transportador;

IN2 = constante que simboliza a área da barra do TCC 2.2 sobre o transportador;

IN3 = sinal de realimentação de velocidade do transportador corrente;

IN4 = sinal de realimentação de velocidade do transportador corrente;

OUT1 = cálculo da taxa de moagem resultante obtido pelos tacômetros.

As constantes 0,75 e 0,8 são ajustadas pelo operador. Somente para o exemplo anterior foram dados com valores diferentes. Normalmente são iguais, pois a área sob a barra do transportador 1.1 e 2.2 são iguais, uma vez que eles só diferem no comprimento e não na largura e altura de raspagem.

Exemplo:

Seja a taxa de 66 [t/h], nas dosagens de 70/30 % pedidos pelo operador na tela de inicialização da moagem:

$$TG = [(0,75 \times 63\%) + (0,8 \times 23\%)] = 47,27 + 18,4 = 65,27 \quad [t/h]$$

Este é o valor mostrado pela saída OUT do bloco de cálculo 2, e serve somente para visualizar a taxa de moagem instantânea. Seu sinal não é realimentado para correção da malha de controle.

7 DESENVOLVIMENTOS REALIZADOS

7.1 Cálculo da Taxa de Retomada dos Silos de Carvão Bruto

A taxa de retomada do silo de carvão bruto, **TR**, é o principal desenvolvimento que possibilitou o controle fino da taxa de moagem e das relações de dosagem entre carvões AV e BV.

A taxa de retomada horária mede a variação do peso do silo de carvão bruto. A TR é calculada de 5 em 5 minutos, e seu resultado é armazenado numa memória conforme mostra a equação (6):

$$TR = 12 \times \frac{dW}{dt} = 12 \times \{ w(t-5) - w(t) \} \quad [t/h] \quad (6)$$

onde:

$W(t-5)$ = peso do silo de bruto a 5 minutos atrás;

$W(t)$ = valor do peso do silo de bruto em [t];

dW/dt = variação negativa do peso do silo de bruto nos últimos 5 minutos.

Quando o cálculo é executado, seu resultado é carregado numa memória de 9 dados do tipo FILO (“First In Last Out”), retratando a taxa de retomada do silo de carvão bruto nos últimos 45 minutos, conforme ilustra a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1. Memória de dados FILO para o silo 1.

Memória FILO	TR [t/h]	dW/dt [t/5min]	Peso do silo 1 [t]
1	60	5,0	505
2	60	5,0	510
3	66	5,5	515
4	0	0,5	520,5
5	90	7,5	521,0
6	54	4,5	528,5
7	66	5,5	533,0
8	72	6,0	538,5
9	60	5,0	544,5

A cada 5 minutos o dado 9 é descartado, e a fila de dados é movimentada. O novo valor de taxa de retomada calculada em (6) é colocada na memória 1 da FILO.

Para cada silo de carvão grosso foi criada uma memória FILO para armazenagem das medições de taxas de retomada para introduzir uma realimentação na malha de controle e torná-la fechada.

Para se obter uma noção da taxa de moagem real a médio prazo, calcula-se **TR** médio, que é a média móvel das últimas 9 taxas de retomadas executadas. A formula (7) ilustra:

$$TR_{médio} = \frac{\sum TR}{9} = \frac{528}{9} = 58,6 \quad [t/h] \quad (7)$$

Foi implantado um “cut-off” de 0,5 ton para dW/dt . Assim, para todo valor menor que 0,5 ton de variação em 5 minutos, a taxa de retomada calculada para 1 hora será zerada. A memória 4 da FILO ilustra esta situação. Isto evita ruídos e serve

como condição para as ações a serem tomadas contra o engaiolamento do carvão no silo, como será visto adiante.

7.2 Introdução do Ajuste Fino na Malha Principal do Controle da Moagem

A Figura 4 mostra como a realimentação do cálculo da taxa de moagem baseada no decréscimo do peso do silo de carvão bruto no tempo foi introduzida com o auxílio do item “Bias” do bloco “Ratio”.

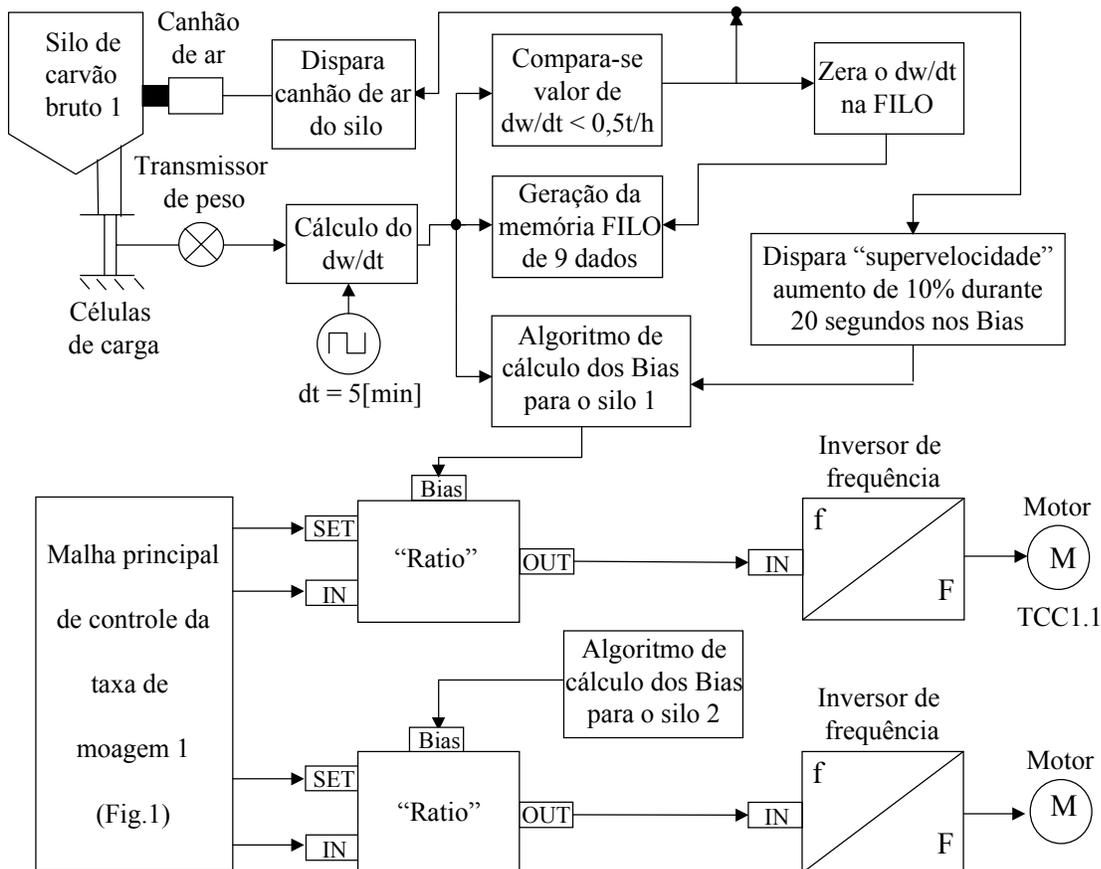


Figura 4. Realimentação para a malha de moagem.

Aplicando a equação (2) para cada transportador tipo corrente, temos:

$$OUT1 = [(SET \times IN) + Bias \text{ TCC 1.1}] \quad (8.1)$$

$$OUT2 = [(SET \times IN) + Bias \text{ TCC 2.2}] \quad (8.2)$$

O fator de compensação, “Bias”, foi introduzido para aumentar ou diminuir a velocidade do transportador corrente em 1% na escala E da Figura 3 a cada 5 minutos. Isto ocorre de acordo com a comparação entre a taxa de moagem pedida pelo operador (SP) e taxa retomada calculada (TR) pela nova fórmula (6). Ele soma ou subtrai um pequeno percentual no pedido final de frequência para o inversor, modulando a velocidade do TCC.

7.3 Geração do Set-point do Controlador Fino de Taxa de Retomada do Silo de Carvão Grosso

A Tabela 2 ilustra a geração de set-point de taxa de retomada, **SP**, para comparação pelo algoritmo do “Bias” com medição de taxa de moagem realizada a cada 5 minutos, **TR**.

Tabela 2. Set-point usado no algoritmo do “Bias”.

		Taxa de moagem pedida [t/h]	Taxa de retomada calculada [t/h]	Taxa de retomada calculada [t/h]
Operador	Moagem 1	66	TCC 1.1 – 70%	TCC 2.2 – 30%
	Moagem 2	66	TCC1.2 – 30%	TCC 2.1 – 70%
Taxa de retomada total do silo de carvão bruto 1 [t/h]		92,4	46,2	46,2
Taxa de retomada total do silo de carvão bruto 2 [t/h]		39,6	19,8	19,8
Total pedido para as 2 moagens [t/h]		132	66	66

7.4 Algoritmo de Cálculo do “Bias”

A compensação proporcionada pela medição real de retomada do silo (**TR**) versus o ajuste pedido pelo operador (**SP**) deve-se a variação do “Bias” de acordo com o algoritmo descrito na figura 5. Ele compensa a vazão baixa de carvão devido as válvulas agulhas fechadas ou falta de barras no transportador tipo corrente, ou ainda, a fluidez baixa do silo de carvão.

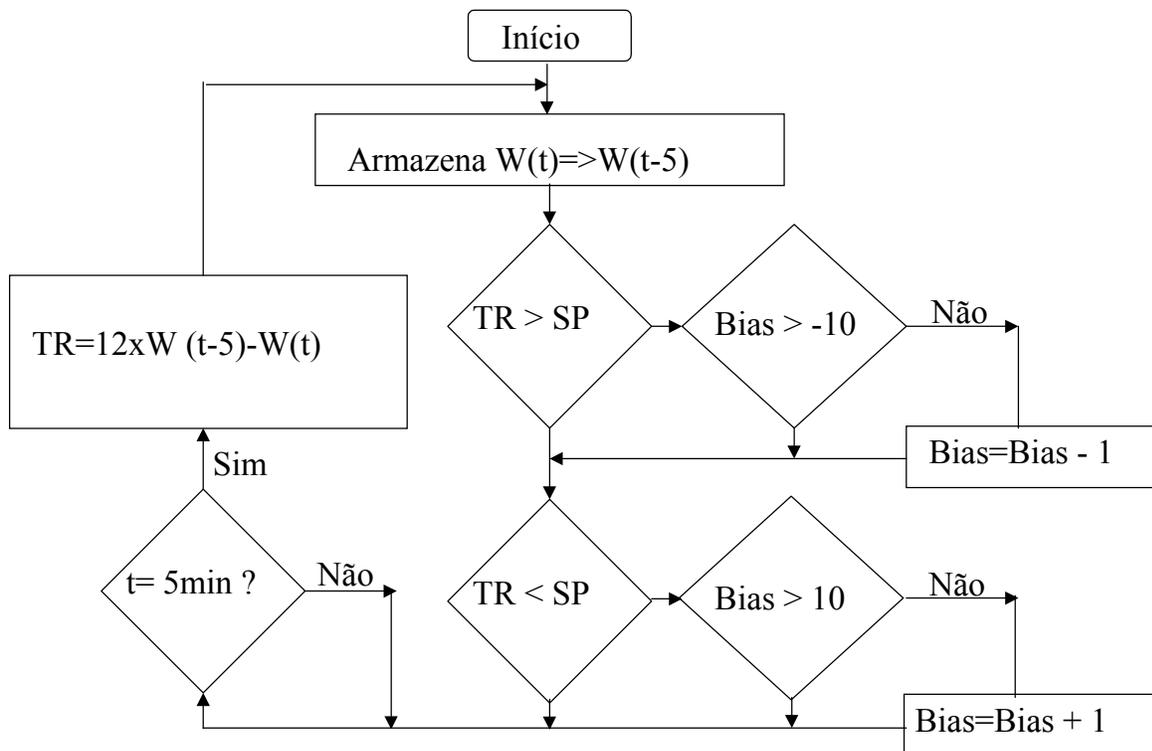


Figura 5. Algoritmo de cálculo de “Bias”.

7.5 Faixa de Variação do “Bias”:

A Figura 6 ilustra a faixa de compensação permitida para o fator “Bias” pela experiência prática. Na partida da moagem, os valores de “Bias” são zerados estabelecendo as condições iniciais de funcionamento. Quando ocorrem engaiolamentos de carvão bruto no silo, com o passar do tempo a malha do “Bias” coloca um alto valor, por exemplo 15%. Assim o transportador fica muito acelerado e quando o engaiolamento é desfeito, o moinho recebe uma alta carga de carvão, embuchando e levando ao desarme do motor principal por sobrecarga. Portanto, o limite superior foi ajustado em + 10%.

Por outro lado, para frequências menores que 30Hz o TCC é limitado sendo desarmado pela lógica de controle. Portanto, para evitar que este limiar seja atingido, o limite inferior foi ajustado em -10%.

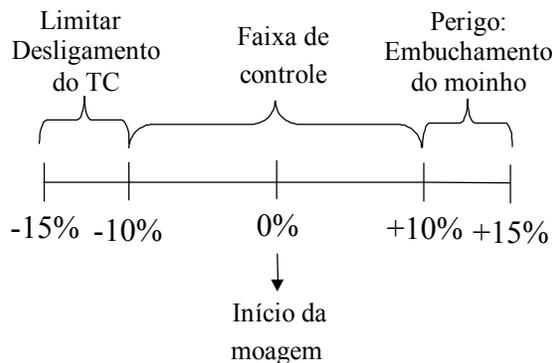


Figura 6. Faixa de controle permitida para o fator de compensação.

8 PRINCIPAIS AÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

8.1 Detetor de Entupimentos ou Engaiolamento

O valor zerado de **TR** pode significar um entupimento, ou engaiolamento do silo de carvão bruto tal como exemplificado na memória 4 da FILO. Isto desabastece o moinho, elevando sua temperatura de saída e vibração próximos a níveis de desarme da moagem.

As seguintes ações são tomadas pela lógica de controle desenvolvida visando evitar o desarme da moagem:

- A) Acionar os canhões de ar para promover o desmoronamento do cascão de carvão bruto no interior do silo;
- B) Acionar automaticamente a “supervelocidade momentânea”;
- C) Emitir alarme sonoro para o operador.

Para tal uma cópia da Tabela 1, junto com a Tabela 2 foram incorporadas para visualização na tela gráfica de alimentação dos moinhos.

8.2) Supervelocidade:

A supervelocidade foi um recurso implantado no acionamento dos inversores dos transportadores, cujo objetivo é promover o deslocamento do cascão através de um surto rápido de retomada.

Sua ação é aumentar o valor de “Bias” em 10% independente dos limites do algoritmo de controle durante um curto período de tempo (20 segundos). Isto visa

compensar os 5 minutos passados em que não houve decréscimo do peso do silo de carvão bruto, bem como desagregar seu cascão.

9 EFEITOS COLATERAIS E AÇÕES REMANESCENTES

Durante o abastecimento de carvão pelo pátio, a malha de controle do “Bias” tem que ser desativada. Isto é feito parando-se o temporizador periódico (5 minutos) de amostragem. Assim não ocorrerão mais correções no “Bias”, permanecendo em seu último valor.

Para detecção de silo sendo abastecido, primeiramente foram usados os sinais digitais de correia de abastecimento do pátio **P6** e **P7** em funcionamento, veja figura 1. Porém a experiência nos mostrou que a malha ainda ficava sujeita a erros devido a queima de fusíveis da entrada digital, que leva a valores instáveis e extremos para a correção do “Bias”, lotando o moinho de carvão e desarmando o motor por sobrecarga.

Foi desenvolvido então o alarme de “vel+” que detecta se o peso do silo de bruto sofreu acréscimo positivo de peso num ultimo intervalo recente de tempo, ou seja, se a derivada do peso do silo de bruto é positiva. Assume-se que o silo está sendo abastecido quando qualquer um dos dois sinais descritos está ativo. Portanto, nestas ocasiões o temporizador é paralisado até que o silo pare de ser abastecido pelo pátio e as correias **P6** e **P7** sejam desligadas.

Uma vez que o silo está cheio e o abastecimento do pátio parou a correia, a malha de controle do “Bias” voltará a atuar, preenchendo novamente a memória FILO das taxas de retomadas dos respectivos silos de carvão grosso.

10 CONCLUSÕES

O fator de influência e controlador PID tem hoje pouca relevância e função prática no controle da taxa de moagem e dosagem. Ele poderia ser desconectado e apagado da malha de controle, porém para preservar a função de segurança contra embuchamento e sobrecarga, funções foram preservadas.

A introdução da realimentação do decréscimo do peso do silo de bruto para ajuste fino na taxa de moagem e dosagem dos carvões proporcionou o acerto da taxa de moagem e dosagem nominais bem como visualizar engaiolamentos dos silos de carvão bruto.

As ações complementares obtidas com a nova estratégia de controle inteligente, evita desarmes das plantas de moagem por vibração alta do moinho devido a falta de carvão. Isto permitiu uma estabilidade maior para a planta de moagem de carvão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Ferreira, A.R.C.; Automação de Instalações para moagem de carvão em fábricas de cimento – CEFET/MG;
- 2 Manual de configuração do SDCD Centum CS da Yokogawa®;

DEVELOPMENT OF LOOP CONTROL FOR GRINDING COAL PLANT OF CSN'S PCI

Ricardo Sebastião Nadur Motta¹
Sandro Lopes Alberto²
Alcides José de Lucena Silva³
Ramon Marques Abrita⁴

Abstract

The Pulverized Coal Injection of CSN has got two grinding plants. The grinding nominal capacity is 66 t/h of raw coal. Each mill generates about 60 t/h of pulverized coal with at the most 2,2% of humidity. Each grinding plant has got two trough chain conveyors that feed the mill providing the mix of high and low volatile coal. This mixture seeks for larger replacing rates of substitution coal per coke in the Blast Furnace. The grinding plants feed two silos of pulverized coal with 1000 t of capacity each. They supply the three coal injection stations. Each Injection station has the capacity of 40 t/h. There is one for the Blast Furnace #2, and the others two are for the odd and even coal injection lances of the Blast Furnace #3. This work describes the improvements in the loop control of grinding and dosing for the mills of CSN's PCI. A fine adjustment was implanted inside the original control, based on the raw coal silo weight decrement in time. This feedback acts in the speed of trough chain conveyors driving according to the last dw/dt . The analysis in real time of the comparison between grinding and dosing rates asked by the operators and the rates of raw coal silo reclaimed in the last 5 minutes, provided more advanced strategies for the control of grinding coal rate. There were also actions in the control logic, such as: trigger the big blast located at silo's wall, and temporary increase of the trough chain conveyors. These actions tries to destroy the hanging inside the raw coal silo, in order to avoid mill's vibration due to the lack of raw coal reclaimed.

Key-words: Grinding coal plant; Pulverized coal injection; Blast furnace.

¹ Automation and Industrial Control Engineer - nadur@csn.com.br;

² Process Operation Engineer - sandro.lopes@csn.com.br;

³ Control Process Technician alcides.lucena@csn.com.br;

⁴ Trainee of Engineering ramon.abrita@csn.com.br;