

# Automação de instalações para moagem de carvão em fábricas de cimento

Augusto Rabelo da Costa Ferreira \*

1. INTRODUÇÃO
2. CONDIÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DE UMA EXPLOSÃO
3. FATORES QUE INFLUENCIAM A EXPLOSIVIDADE
4. MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA EXPLOSÕES E INCÊNDIOS
5. ALTERNATIVA PARA A PREPARAÇÃO DO CARVÃO
6. DESCRIÇÃO DE UMA INSTALAÇÃO DE PREPARAÇÃO DE CARVÃO COM QUEIMA INDIRETA
7. MALHAS DE CONTROLE
8. ARQUITETURA DE UM SISTEMA DE CONTROLE
9. CONSIDERAÇÕES GERAIS
10. BIBLIOGRAFIA

\* Engenheiro Supervisor de projetos de automação industrial da Paulo Abib Engenharia S/A; Professor do CEFET/MG



## Resumo

De início, será feita uma análise das características que influenciam a combustão e explosividade do carvão, seguida de um estudo dos métodos de proteção contra explosões e incêndio. Após esta introdução, será discutido o processo de uma preparação do carvão para sua queima em fornos industriais, sendo feita uma

descrição detalhada da instrumentação necessária ao controle do processo e segurança da instalação.

Apresentaremos, ainda, uma solução, por nós desenvolvida em uma planta de preparação de carvão, para permitir a substituição dos SDCDs (Sistemas Digitais de Controle Distribuído), ainda não disponíveis no mercado interno brasileiro, por equipamentos inteiramente nacionais.

## 1. Introdução

Desde o início da crise energética, especialmente a partir de 1973, as indústrias que consomem grandes quantidades de óleo combustível, como, por exemplo, as fábricas de cimento, aceleraram os estudos para a substituição deste combustível por outros tipos que garantissem um abastecimento seguro, mesmo em épocas de crise, e cujos preços fossem mais vantajosos e estáveis.

O carvão, quer seja pelas gigantescas reservas minerais já conhecidas ou pelo fato de ser uma energia renovável, no caso da utilização do carvão vegetal, voltou a ocupar uma posição de destaque como o combustível da atualidade. Em consequência do aumento vertiginoso dos preços no mercado de óleo cru e de gás natural, a utilização do carvão passou a significar, ainda, uma economia substancial nos custos de fabricação, uma vez que, hoje, este combustível é mais barato que aqueles.

No entanto, o manuseio de pós de carvão traz em si riscos de explosões e incêndios, conforme atestam os acidentes já ocorridos em diversas instalações de preparação de carvão, exigindo o emprego de técnicas modernas para a medição e o controle das variáveis críticas do processo.

## 2. Condições para a ocorrência de uma explosão

Para ocorrer explosões em pós combustíveis é necessário que sejam satisfeitas simultaneamente três condições básicas:

### 2.1. Presença de combustível

Misturas de pó de carvão com ar, de maneira semelhante ao que ocorre com vários sólidos combustíveis finamente divididos e em suspensão no ar, são explosíveis dentro de um certo intervalo de concentração de pó. Para a maioria dos carvões, este intervalo é limitado pelos seguintes valores:

- extremo inferior: variando entre 40 e 130 g/m<sup>3</sup>
- extremo superior: variando entre 2000 e 6000 g/m<sup>3</sup>

Nas instalações de moagem e secagem, as concentrações encontradas estão próximas ao extremo inferior do intervalo, chegando a ultrapassar o limite de segurança em vários pontos do processo.

Nos casos de sistemas de transporte pneumático de carvão as concentrações encontradas são normalmente superiores ao extremo superior do intervalo, garantindo uma relativa segurança à instalação no que se refere a riscos de explosões em condições normais de operação.

### 2.2. Presença do comburente (O<sub>2</sub>)

A concentração crítica de O<sub>2</sub> é função do tipo de carvão que se esteja manuseando. Para um carvão semi betuminoso, como é o caso dos carvões brasileiros, a concentração crítica de O<sub>2</sub> é de 14%. Para um carvão do tipo linhito, a concentração crítica passa a ser de 12%, em virtude do seu alto teor de voláteis. Como regra geral para um projeto de instalações de carvão, adota-se 12% como o valor máximo admitido para a concentração de O<sub>2</sub> nos gases de secagem do carvão.

### 2.3. Existência de uma fonte de ignição

Para deflagrar um processo de combustão é necessária uma energia de ativação, cuja intensidade dependerá,

principalmente, das características do pó combustível manuseado. Nas plantas de preparação de carvão a fonte de ignição poderia ser, por exemplo, um faiscamento provocado por um metal lançado, juntamente com o carvão granulado, dentro do moinho.

A energia necessária para a inflamação de um carvão com um teor de voláteis de 25% é da ordem de 120mJ (uma faísca de um rebôlo, por exemplo). Para o carvão vegetal a energia requerida cai para cerca de 20mJ.

Conforme veremos mais adiante as técnicas ativas de produção para as plantas de carvão baseiam-se na anulação de, pelo menos, uma das três condições, discutidas acima, necessárias a uma explosão.

### 3. Fatores que influenciam a explosividade

Podemos dizer que há fatores que podem aumentar a intensidade e o risco de uma explosão, quais sejam:

- a) Aumento no teor de voláteis
- b) Diminuição no diâmetro das partículas
- c) Concentração de pó (conforme já discutido)
- d) Tipo de carvão (se é mineral ou vegetal, por exemplo).
- e) Diminuição do teor de inertes ou cinzas
- f) Aumento da temperatura
- g) Aumento da concentração de oxigênio

### 4. Métodos de proteção contra explosões e incêndios

Podemos agrupar os métodos de proteção em dois grandes grupos, ou seja, proteções ativas e passivas.

#### 4.1. Proteções ativas

São aquelas medidas que têm o carácter preventivo, atuando no sentido de evitar a explosão através da neutralização de, pelo menos, uma das três condições (ver item 2) necessários à sua ocorrência.

Recomenda-se à uma instalação de preparação de carvão pelo menos as seguintes medidas:

- a) Utilização de gases inertes nos processos secagem e moagem (concentração de  $O_2 < 12\%$ ).
- b) Temperaturas baixas dos gases à saída do moinho<sup>3</sup> (onde a concentração de carvão, da ordem de 300 g/m<sup>3</sup>, é crítica).
- c) Existência de detetor de metais e extrator de sucatas antes da alimentação de carvão granulado no moinho, de forma a minimizar a possibilidade da formação de faíscas no seu interior.
- d) Medições de temperatura, localizadas estrategicamente, para a detecção e sinalização de níveis perigosos de operação.

e) Detetores de movimento dos eixos dos equipamentos envolvidos com o transporte de carvão, de forma a sinalizar um provável acúmulo de pó decorrente de uma parada do equipamento mesmo com seu motor em funcionamento (quebra de eixo ou do acoplamento, por exemplo).

f) Superfícies dos silos, dutos e ciclones com inclinações adequadas, de maneira a evitar deposição de pó.

g) Aterramento eficiente de todos os equipamentos, silos e dutos para eliminação de cargas eletrostáticas.

h) Utilização de instrumentos, motores e demais equipamentos elétricos instalados na área com invólucros IP-65 (DIN 40050), no mínimo.

#### 4.2. Proteções passivas

Os métodos passivos de proteção são aqueles que têm como objetivo minimizar os efeitos decorrentes de uma combustão já iniciada.

Dentro do elenco das medidas passivas recomendadas podemos ressaltar as seguintes:

- a) Análise da concentração de CO nos gases de secagem na saída do sistema (saída do filtro de mangas) e do silo de carvão moído (silo fechado), para a detecção de um início de combustão.
- b) Medições de temperatura nos pontos onde existe acumulação de pó ou seja, silos de carvão moído, ciclones e moegas dos filtros de mangas, para detetar um sobreaquecimento localizado devido ao chameuscamento do carvão.
- c) Estrutura dos equipamentos de processo reforçadas de modo a suportar a pressão máxima que poderá ser provocada por uma explosão.
- d) Válvulas e portas de alívio de explosão nas tubulações de saída do moinho, nos filtros de mangas, nos ciclones e nos silos de carvão moído.
- e) Medição da perda de carga e colocação de um sistema de válvulas acionadas pneumaticamente para "by-pass" do filtro de mangas localizado na saída de gases do sistema.
- f) Sistema de extinção de incêndio com a utilização de  $CO_2$  ou  $N_2$ .

g) Medidas operacionais no sentido de minimizar a ocorrência de situações propícias à explosões, como por exemplo:

. evitar paradas e partidas frequentes do moinho através do controle adequado da alimentação de carvão granulado em função da capacidade disponível para a estocagem do carvão moído.

. No caso de uma parada prolongada esvaziar todo o sistema eliminando-se depósitos de pó em qualquer ponto do mesmo.

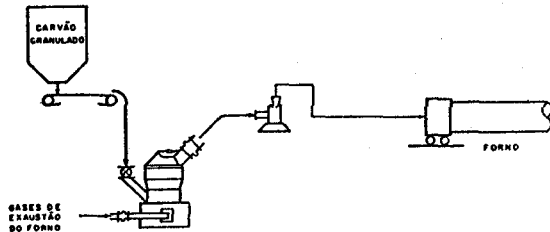
### 5. Alternativas para a preparação do carvão

A seguir apresentaremos, resumidamente, as três configurações de processo mais encontradas para a preparação de carvão, como combustível para fornos de fabricação de cimento.

## 5.1. Processo de queima direta

Nesse sistema o carvão moído é transportado diretamente para o forno juntamente com os gases resultantes das operações simultâneas de moagem e secagem. Trata-se do esquema mais simples e aquele que apresenta a maior facilidade de controle, sob o ponto de vista de segurança, devido a inexistência de filtros de mangas e de pontos de acúmulo de pó no sistema (fig.1).

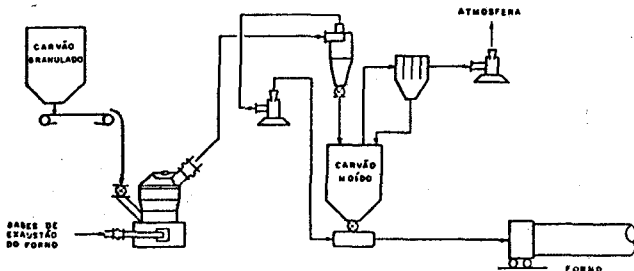
Figura 1 - Processo de queima direta



## 5.2. Processo de queima semi-direta

Nesta configuração o pó é separado em um silo intermediário enquanto os gases efluentes do moinho são transportados ao forno como suprimento de ar primário. Há uma certa vantagem sobre o sistema de queima direta, com relação à disponibilidade de combustível (fig.2).

Figura 2 - Processo de queima semi-direta

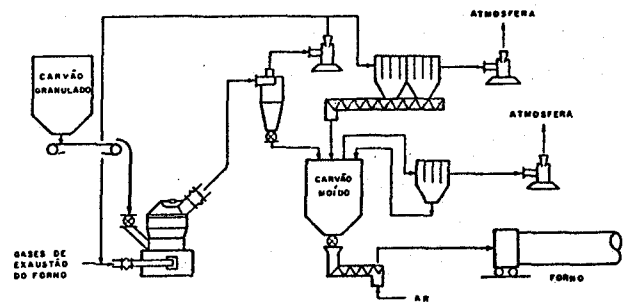


## 5.3. Processo de queima indireta

É um sistema caro, porém é o mais usado nas instalações de grande porte devido ao fato de ser o mais versátil, sob o ponto de vista de operação do forno, uma vez que a instalação de preparação do carvão é independente, permitindo a estocagem de uma quantidade de carvão moído em um silo, de onde este combustível é transportado para o queimador do forno sem o concurso dos gases de secagem. O sistema de queima pode, assim, ser operado com uma relação de ar primário ótima para a geração da chama ideal. Esta configuração apresenta ainda a possibilidade de recirculação de gases melhorando sobremaneira as condições de controle de temperatura e pressão do sistema. A maior desvantagem desta alternativa reside na necessidade de instalação dos filtros de mangas e do silo intermediário exigindo, conseqüentemente, um sistema de controle e instrumentação mais sofisticado para garantir a segurança e a boa performance do processo (fig.3).

Daqui por diante, discutiremos com mais detalhes o sistema de queima indireta apresentando, inclusive, as soluções de controle e segurança já aplicadas em plantas de preparação de carvão, para fábricas de cimento no Brasil.

Figura 3 - Processo de queima indireta



## 6. Descrição de uma instalação de preparação de carvão com queima indireta

O carvão com tamanho máximo de partícula e umidade de até 50mm e 25%, respectivamente, é retirado de um silo através de um alimentador de correia com velocidade variável, alimentando um moinho vertical de rolos.

Dentro do moinho se processa tanto a redução de tamanho das partículas de carvão como a secagem das mesmas até uma umidade residual de 1,5 a 2% utilizando-se, para isto, os gases quentes inertes oriundos da exaustão do próprio forno a ser alimentado.

O tipo de moinho utilizado dispõe de um classificador estático, onde é feita a separação das partículas maiores que retornam ao moinho, sendo que as menores são transportadas pneumáticamente para o sistema de separação gás-sólido.

Tal sistema é constituído de um ciclone, onde a maior parte do pó de carvão é coletada, passando para o silo de carvão moído através de uma válvula rotativa. O "overflow" do ciclone é conduzido para um filtro de mangas, onde é separado o restante de sólidos, sendo os gases lançados para a atmosfera.

No filtro de mangas existe um conjunto de válvulas atuadas pneumáticamente para bloqueio e "by-pass" automático do filtro nas situações de emergência.

A linha de recirculação de gases indicada na fig.3 tem como finalidade manter constante o volume dos gases para transporte do pó, independente da vazão de gases quentes admitida no sistema.

O silo de carvão moído é fechado, exigindo o emprego de um pequeno filtro de mangas para o seu despeiramento e rarefação de ar no interior do silo. A descarga poderá ser feita com a utilização de um sistema de fluidização do material, junto à saída do silo, com ar comprimido e, alternativamente, CO<sub>2</sub> gasoso.

Não entraremos aqui, no mérito do sistema de queima do carvão no forno, uma vez que o presente trabalho visa, principalmente, a discussão das técnicas de controle e segurança utilizadas no beneficiamento e estocagem do carvão beneficiado e não sua posterior utilização em queimadores de fornos industriais.

# 7. Malhas de controle

A figura 4 mostra as diversas malhas de controle necessárias a um controle automatizado de um processo de beneficiamento com a queima indireta do carvão, incluindo a instrumentação destinada à supervisão e monitoração das variáveis que afetam diretamente a segurança da instalação, bem como, os diversos detetores capazes de acusar um incêndio ou mesmo um início de combustão dentro do sistema.

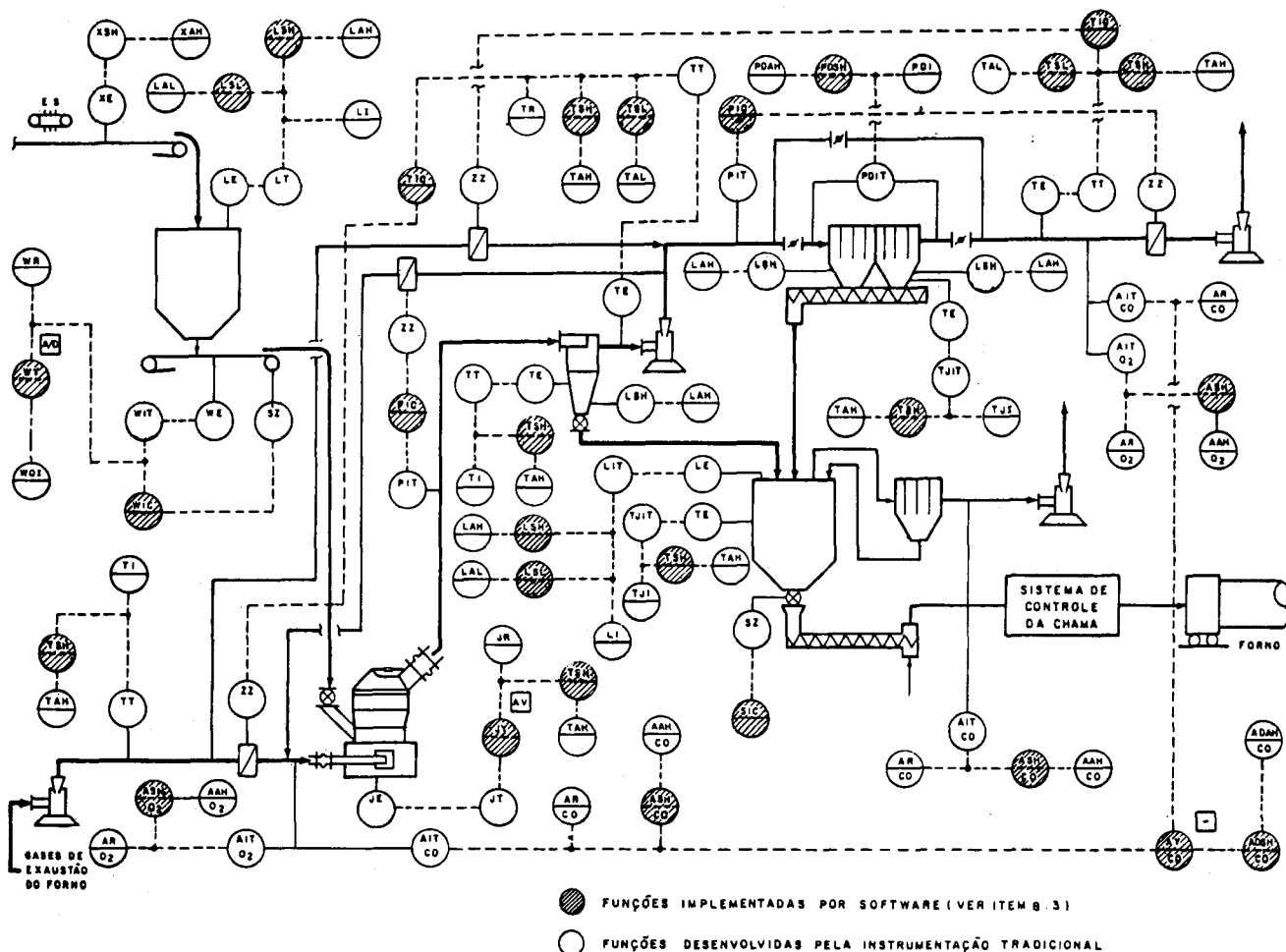
São mostrados, ainda, os registradores que julgamos indispensáveis ao diagnóstico da(s) causa(s) de um

acidente que porventura ocorrer, ou mesmo, para uma avaliação periódica do grau de segurança com que a planta tem operado.

Chamamos a atenção para a possibilidade da implementação por "software" em controladores programáveis de várias funções que, até agora, vem sendo tradicionalmente realizadas pela instrumentação analógica convencional. Estas funções estão indicadas na figura 4, sendo discutidas em detalhes no item 8 deste trabalho.

Apresentaremos, em seguida, uma breve descrição de cada uma das malhas de controle indicadas na figura 4.

Figura 4 - Fluxograma PBI processo de queima indireta



## 7.1. Detetor de metais

Na correia que alimenta o silo de carvão granulado deve ser colocado um detetor de metais para acusar a presença de elementos metálicos que porventura não tenham sido removidos pelo extrator de sucatas previsto antes do detetor (ver item 4.1.c).

## 7.2. Nível do silo de carvão granulado

Tem como finalidade básica permitir o ajustamento da operação de britagem (ou recuperação do carvão já britado e estocado em pilhas) à demanda solicitada pelo circuito de moagem.

## 7.3. Alimentação de carvão no moinho

A correia sob o silo de carvão granulado dispõe de um sistema de variação de velocidade e de uma balança para medir a vazão (t/h) do carvão que está sendo introduzido no moinho. O sinal de saída da balança é usado para registrar e controlar a alimentação do moinho (através de um controlador PI manipulando a velocidade do alimentador) bem como, para totalizar a produção da planta.

## 7.4. Gases de entrada no moinho

Existe uma medição da temperatura dos gases quentes vindos do forno e um alarme para o caso de a temperatura exceder o limite de segurança previsto.

Junto ao moinho recomenda-se que seja feita uma amostragem dos gases de secagem para a análise em linha dos teores de CO e O<sub>2</sub>. Caso a concentração destes gases ultrapasse os valores máximos permitidos será acionado um alarme, devendo ocorrer ainda as providências previstas no intertravamento dos equipamentos da instalação.

## 7.5. Temperatura dos gases de secagem

A medição de temperatura dos gases de secagem é feita após o ciclone, mais exatamente na tubulação do "overflow" deste. O sinal correspondente a esta temperatura passa a ser então a variável controlada em um controle do tipo PID cuja saída atua na abertura da válvula gelosia que controla a admissão dos gases quentes. Quando, por exemplo, a temperatura dos gases aumenta, o sistema, assim concebido, comanda o fechamento da válvula gelosia, diminuindo-se a vazão de gases quentes à entrada do moinho.

O sinal da temperatura em questão também é usado para a geração de alarmes de baixa e altas temperaturas, atenção (TSH) e emergência (TSHH), sendo que este último poderá ser usado para detectar incêndios.

## 7.6. Depressão na saída do moinho

A ação de controle da malha descrita no item 7.5 cria distúrbios indesejáveis, alterando o volume total de gases disponível ao transporte do pó de carvão produzido, comprometendo a capacidade de arraste do sistema. Porém este distúrbio poderá ser compensado através do controle da depressão na saída do moinho, que poderá ser mantida constante, através do posicionamento automatizado da válvula gelosia instalada na linha de recirculação de gases.

## 7.7. Temperatura dos gases de saída

A condensação da umidade no interior do filtro de mangas, localizado na saída dos gases de secagem para a atmosfera, é altamente prejudicial ao sistema, causando o entupimento prematuro das mangas, o que acarretará uma diminuição da capacidade de moagem da instalação, além de facilitar o acúmulo de pó nas moegas do filtro e no interior do moinho, propiciando o aparecimento de incêndios.

Para proteger o filtro contra esta condensação recomenda-se controlar a temperatura dos gases de saída, através da abertura de uma válvula gelosia que adiciona gás quente ao fluxo gasoso que vai ter ao filtro de mangas, de forma a impedir que a temperatura atinja níveis muito baixos.

O sinal correspondente a esta temperatura deve ser utilizado, também, para a geração de alarmes de baixa e altas temperaturas atenção (TSH) e emergência (TSHH), sendo que este último poderá ser interpretado como a ocorrência de incêndio.

## 7.8. Pressão na entrada do filtro de mangas

A ação dos controles descritos nos itens 7.5 e 7.6 cria uma instabilidade na pressão de entrada do filtro de mangas. Pode-se estabilizar esta pressão a partir de um controle automático que atua na válvula gelosia localizada antes do exaustor existente à saída do filtro.

## 7.9. Pressão diferencial do filtro de mangas

A pressão diferencial do filtro de mangas indica o grau de permeabilidade em que se encontram as mangas. Para uma operação segura do filtro é importante o acompanhamento desta pressão, sendo que, no caso de  $\Delta P$  medido exceder a um determinado valor tido como anormal, suas causas deverão ser investigadas e corrigidas.

## 7.10. Análise dos gases de secagem

No caso de um início de combustão no pó de carvão em algum ponto do circuito de moagem/secagem, a elevação do teor de CO nos gases de saída para a atmosfera acontecerá instantaneamente. Por isto pode ser dizer que a análise do teor de CO é o método mais eficiente para se detectar a ocorrência de um "chamuscamento"incipiente no carvão, cuja intensidade não é suficiente para sensibilizar os diversos sensores de temperatura que foram, estrategicamente, colocados na planta.

Como os gases quentes injetados no sistema podem já conter um alto teor de CO, recomenda-se tomar o diferencial da concentração de CO na saída e entrada do sistema como uma indicação da formação de CO no interior do sistema (ver fig.4).

A análise do teor de O<sub>2</sub> neste ponto também é muito importante, pois indica a existência de uma entrada de ar falso, propiciando o suprimento do comburente (O<sub>2</sub>) necessário à uma explosão.

## 7.11. Temperatura/nível no ciclone e filtro de mangas

Recomenda-se a instalação de sensores de temperatura e nível no ciclone e nas moegas do filtro de mangas para a detecção de incêndio ou acumulação de pó no interior destes equipamentos. O acúmulo de pó nestes pontos poderá, após algum tempo, possibilitar o fenômeno da auto-ignição provocando o início de um incêndio.

## 7.12. Nível/temperatura/concentração de CO no silo de carvão moído

Para monitorar a capacidade de estocagem do pó de carvão produzido torna-se indispensável a medição do nível do silo de carvão moído, com indicação contínua e alarmes de nível baixo e alto disponíveis no painel de controle central.

Caso o pó de carvão, que está sendo estocado no silo, saia do circuito de moagem/secagem com algumas partículas já em combustão, poderá ser iniciado um incêndio no silo, uma vez que existe abundância de O<sub>2</sub> devido ao fato do sistema de descarga utilizar ar para a fluidização de material junto a saída do silo. Aconselha-se, então, a colocação de vários sensores de temperatura inseridos na massa do carvão, de forma a detectar a combustão no interior do volume estocado.

Poderá ocorrer, porém, uma combustão localizada em um ponto intermediário entre as sondas e, como o carvão não é um bom condutor de calor, existe a possibilidade dos sensores de temperatura não detectarem esta ocorrência. Para aumentar a confiabilidade do sistema de detecção de incêndio no silo recomenda-se a utilização de um analisador de

O instalado na saída do filtro de mangas de despeiramento do silo.

## 8. Arquitetura de um sistema de controle

Apresentamos, a seguir, as características gerais do "hardware" e do "software" relativos ao controle de uma instalação de moagem/secagem de carvão, com queima indireta, utilizando-se a tecnologia de controladores programáveis.

### 8.1. Porque controlador programável

Analisando as diversas possibilidades para a implementação do "software" de controle, pode se chegar a conclusão que a utilização de controladores programáveis é a mais adequada devido às várias vantagens oferecidas por esta alternativa, cabendo aqui ressaltar as seguintes:

a) Menor custo quando comparada com uma solução convencional que utiliza relés eletromecânicos, controladores PID analógicos, cartões auxiliares de rack para a instrumentação, etc.

b) Maior disponibilidade da planta devido a confiabilidade do sistema.

c) Maior facilidade e rapidez na detecção de defeitos no sistema elétrico.

d) Alta flexibilidade, permitindo até modificações "on-line".

e) Modularidade e padronização.

f) Disponibilidade de funções aritméticas, lógicas e analógicas (inclusive o manuseio de variáveis do processo).

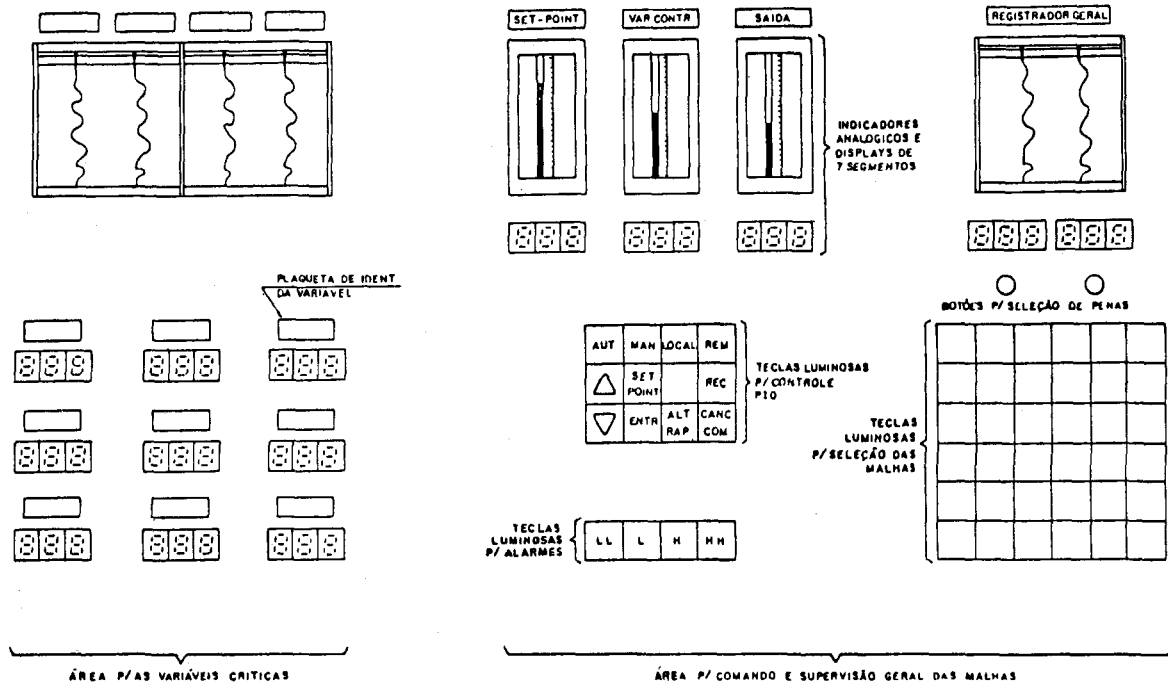
g) Disponibilidade e facilidade de interface com computador, permitindo a integração da planta de preparação de carvão ao restante do complexo industrial, formando um sistema de controle distribuído que possibilitará o gerenciamento e a operação otimizada do conjunto.

### 8.2. Interface com o operador

Neste item será esclarecido o interface homem-máquina relativo as variáveis analógicas do processo (fig.5).

O interface relativo a variáveis discretas foge ao escopo deste trabalho.

Figura 5 - Interface homem x máquina para as variáveis físicas e químicas do processo



#### 8.2.1 Área destinada a supervisão das variáveis críticas

É composta de registradores analógicos e displays digitais de 7 segmentos para utilização individual das variáveis críticas do processo, sendo sua utilização e análoga ao sistema convencional.

#### 8.2.2 Área para comando e supervisão geral das malhas

- Indicadores analógicos e displays de 7 segmentos.

Existem 3 indicadores analógicos e 3 displays de 7 segmentos para indicação do "set-point", variável controlada e do sinal de saída, respectivamente, referentes a malha de controle selecionada pelas teclas de seleção de malhas (item abaixo).

- Teclas luminosas para controle PID

São usadas para seleção automático/manual, local/remoto, ajuste de "set-point", elevação ou redução do sinal de saída quando em controle manual, referente à malha de controle selecionada.



#### - Teclas luminosas para alarme

Utilizadas para discriminar a anormalidade sinalizada nas teclas para seleção das malhas. (Sinalização referente a malha selecionada).

#### - Registrador Geral

Permite o registro de tendências de duas variáveis quaisquer selecionadas pelas teclas para seleção de malhas.

#### - Teclas luminosas para seleção de malhas

Permitem a seleção de qualquer variável do sistema para a utilização dos recursos partilhados descritos nos itens acima.

Tem também a finalidade de sinalizar as anormalidades nas malhas através do acionamento pulsante da lâmpada correspondente.

### 8.3. Funções implementadas por "software"

#### 8.3.1 Integrador de t/h de carvão

A integração de um sinal contínuo poderá ser feita de várias formas. A solução apresentada, a seguir, segundo nosso ponto de vista, é a que melhor se adapta aos recursos disponíveis nos controladores programáveis, com a vantagem de não introduzir erros devido à arredondamentos nas operações.

São amostrados valores em intervalos de tempo de 1 milésimo de hora; durante este intervalo assumiremos que o sinal se mantém constante. Estes valores, assim amostrados, serão totalizados e chamaremos este total de Q, que será, a cada varredura, comparado com um valor numérico correspondente ao incremento unitário da grandeza medida, que chamaremos de U. Quando Q for maior ou igual à U, faremos  $Q = Q - U$  e sendo, então, enviado um pulso elétrico para incrementar um dígito em um contador eletromecânico.

No caso do sinal da balança apresentar variações rápidas poderemos melhorar a confiabilidade do valor, que foi considerado constante no intervalo referenciado acima, realizando várias amostragens neste intervalo e assumindo a média destes valores como a constante a ser adotada como verdadeira.

#### 8.3.2 Unidade de Alarme

Para detetar se um sinal de medição está abaixo ou acima dos limites mínimo e máximo admitidos para a variável do processo, basta realizar-se uma simples comparação (<, = ou >) entre o valor numérico correspondente ao sinal de entrada e uma ou mais constantes, previamente, carregadas através do terminal de programação do controlador programável. Caso a comparação estabelecida for verdadeira será "aceso" um "bit" que poderá ser utilizado internamente para intertravamento ou para acionar uma saída que ativaria um alarme.

Para minimizar os custos do interface do controlador programável com o painel do operador poderemos utilizar, nos casos de simples indicação "displays" digitais de sete segmentos providos de memória e dotados de uma entrada adicional que, quando energizada, credencia o display à aceitação do sinal, codificado em BCD, colocado em seus terminais. A utilização dos displays, descritos acima, permite que a saída de sinais do controlador programável para os displays seja feita de forma multiplexada,

à partir de um único módulo de saída. Esta solução oferece substancial economia, primeiro, devido ao fato do cartão para saídas discretas ser muito mais barato que o cartão para saídas analógicas e, segundo, porque o número de cartões de saídas, requerido passou a ser menor.

#### 8.3.4 Controladores PID

##### a) Considerações Gerais

O programa que realiza o controle PID é implementado em uma sub-rotina que será chamada pelo programa principal um nº de vezes igual ao nº de malhas de controle que utiliza o PID. A sub-rotina PID recorre, ainda, a 5 outras sub-rotinas auxiliares que foram desenvolvidas para a realização de operações que se repetem.

A atualização da saída de cada malha é feita após um intervalo de tempo  $\Delta T$ , ajustável, ao fim do qual será amostrado o novo valor da variável controlada. Este tempo deve ser ajustado no campo, de forma a adequar o tempo de processamento ao tempo de resposta do processo.

A chamada da sub-rotina PID poderá ser feita, para todas as malhas, em uma única varredura, caso o tempo de resposta do controlador programável para as outras funções desenvolvidas no programa principal não seja crítico ao processo. O tempo de varredura será aumentado em cerca de 6 mili-segundos a cada processamento da sub-rotina PID.

Casos onde o processo exige uma alta velocidade na resolução do programa principal a solução seria a atualização de uma malha por varredura.

##### b) Dados de Performance

Apresentamos, a seguir, as principais características da sub-rotina PID desenvolvida para a nossa aplicação particular:

- a - Ação de controle Direta ou Inversa
- b - Controle Automático e Manual
- c - "Set-point" Local ou Remoto
- d - Transferência M/A com "BUMPLESS"
- e - Proteção contra a saturação do modo integral ("anti-reset windup")
- f - Amortecimento da ação do estágio derivativo, impedindo uma instabilidade provocada por oscilações do processo.
- g - Limites inferior e superior, ajustáveis, para o sinal de saída.
- h - Tempo de resposta em torno de 6 mili-segundos.
- i - Precisão dos cálculos melhor que 1%
- j - Ajustes dos parâmetros PID  
Banda proporcional %: 1 - 999  
Integral (seg/repetição): 1 - 999  
Derivativo (seg): 1 - 999

##### c) Definição do algoritmo

A resposta analógica teórica de um controlador PID é definida pela seguinte equação:

$$V = V_b + \frac{100\%}{BP\ \%} \left( E + \frac{1}{I} \int E dt - D \frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

onde:

V = Saída do controlador

$V_b$  = Constante de polarização

BP = Banda proporcional

E = Desvio (SP - VP)

I = Ajuste da ação integral (seg/repetição)

D = Ajuste da ação derivativa (seg)

VP = Variável do processo

O tratamento digital da função definida acima nos impõe algumas modificações no algoritmo de cálculo, de forma a viabilizar sua implementação em controladores programáveis. A equação que será, então, programada na sub-rotina PID do CP tomará a forma seguinte:

$$V = V_b + \frac{100\%}{BP} E + \sum_{i=0}^n \left( \frac{100 \Delta T}{I} \cdot \frac{E}{BP} \right)_i - \frac{100\%}{BP} D \frac{VP_n - VP_{n-3}}{3 \Delta T} \quad (2)$$

onde:

$\Delta T$  = Intervalo de tempo entre 2 amostragens (de 0,1 a 10 seg.)

$VP_n$  = Valor da variável de processo amostrada no tempo "n".

$VP_{n-3}$  = Valor da variável de processo amostrada  $3 \Delta T$  antes do tempo "n".

O termo correspondente à ação integral na equação 2 mostra que o erro E é assumido constante em todo o intervalo de tempo  $\Delta T$ , ou seja, para o cálculo do incremento unitário do termo integral é considerado que a variável do processo se mantém constante.

A análise do último termo da equação 2 mostra que, na ação derivativa, a taxa de variação na variável de processo foi considerada constante à cada intervalo de tempo de  $3 \Delta T$ . O intervalo de tempo para o termo derivativo foi, propositalmente, estendido para realizar-se uma "filtragem" das oscilações instantâneas do processo.

### 8.3.5 Acionamento dos elementos finais de Controle

No caso do controle de velocidade da correia que alimenta de carvão o moinho, não há maiores problemas, uma vez que o controlador programável dispõe de cartões de saída com os sinais compatíveis com o circuito de entrada do variador de velocidade (4-20mA, por exemplo). Para as válvulas gelosias, que têm acionamento motorizado, os contadores do motor podem ser acionados diretamente por saídas discretas que são ativadas segundo uma lógica apropriada, resultante do tratamento da saída da sub-rotina PID.

## 9. Considerações finais

A utilização de carvão para a queima em fornos industriais, em substituição aos derivados do petróleo, traz em si riscos de explosões e incêndios

no sistema. Porém, se no projeto e na operação da instalação forem observadas as normas de segurança e usados meios adequados para a prevenção destes acidentes, podemos chegar a um nível de segurança tal que torna injustificável o receio, ainda existente, com relação às instalações de beneficiamento, manuseio e queima de carvão.

O emprego de controladores programáveis, como ferramenta de implementação de um SDCD em plantas de carvão, aumenta a segurança nestas, uma vez que foram retirados instrumentos analógicos, que podem apresentar falhas, sendo suas funções desenvolvidas por software no mesmo dispositivo que já está realizando o controle discreto dos motores, das válvulas gelosias e demais equipamentos auxiliares da planta.

## 10. Bibliografia

- (01) BARTEL, H. Pulverized coal supply system of La Molle cement works. Translation ZKG, 8, 1982. p.407-9.
- (02) BIROLINI, P. & SAMMARTIN, L. Explosion properties of pulverized coal and taking them into an account in the construction of coal grinding plants. Translation ZKG, 12, 1979. p.613-6.
- (03) BOWEN, A. E. One look at coal grinding experiences. Nazareth, Coplay Cement Company, s.d.
- (04) DOBROWOLOSKI, M. Guide to selecting distributed digital systems. Intech, June 81.
- (05) FISHBECK, J. Writing PID control loops easily in basic. Control Engineering, October 78.
- (06) MAYCOCK, J. N. Non-direct coal firing experiences. Bethesda, Martin Marietta Cement, s.d.
- (07) KROGEBUMKER, G. Equipment for the safe storage and handling of pulverized fuel: results of the solid fuels; working group of the German Cement Works' Association (VDZ). Translation ZKG, 1, 1982. p.21-3.
- (08) NIEMEYER, E. A. Design and construction of 55 t/hour central coal grinding and drying plant at Lägerdorf; Description of process engineering and safety arrangements. Translation ZKG, 9, 1979. p.415-33.
- (09) OLLER, O. Experiences with indirect coal systems. In: ROCK PRODUCTS INTERNATIONAL CEMENT SEMINAR, 17. Chicago, 1981. p.6-9.
- (10) SCHNEIDER, F. Kohlenaufbereitung und Kohlenfeuerung für Zementdrehöfen. ZKG, 7, 1976.
- (11) SHINSKEY, F. G. Process-control systems. s.l., Mc Graw Hill, 2.ed., 1979. p.85-11.
- (12) STECKER, W. Adding software to P & Ds. Intech, Sept. 81.