

SONDAS RADAR DE MEDIÇÃO DO NÍVEL DA CARGA DO AF#3 DA CSN¹

Ricardo Sebastião Nadur Motta²
Francisco Nóbrega de Aguiar³
Moacir Alves dos Reis²
Flávio Machado Barros⁴
Roberto de Oliveira Mariano⁴
Michael Hartnett⁵

Resumo

A medição do nível da carga é essencial para a operação do alto forno, sendo responsável pelo início de cada carregamento, além de fornecer parâmetros para análise de outros dados. O Alto Forno#3 da CSN possui duas sondas para a medição de nível tipo eletro-mecânicas e duas sondas tipo radar de microondas. Este trabalho aborda a experiência da CSN na especificação, projeto e uso das sondas radar. A sonda radar de microondas para a medição do nível da carga do Alto forno é a tecnologia de ponta, que se propõe a substituir a sonda eletro-mecânica. Devido ao seu custo elevado e susceptibilidade as temperaturas altas do topo do alto forno, as sondas radar foram protegidas com válvulas esféricas de isolamento contra temperatura alta e falta de nitrogênio de refrigeração. A filosofia adotada para a segurança das sondas radar levou em conta a possibilidade do travamento da CPU do PLC, falta de energia elétrica, falha do nitrogênio de purga e a remoção das sondas para manutenção ou abertura da janela de visita do topo. A funcionalidade das novas sondas radar, aliadas a confiabilidade do novo sistema de intertravamento, já mostrou por várias vezes a sua eficácia e desempenho medindo níveis antes inacessíveis sob condições adversas de operação do alto-forno.

Palavras-chave: Alto forno; Topo; Sondas de nível; Sonda radar.

BURDEN LEVEL RADAR PROBES AT CSN's BF#3

Abstract

The burden level measurement is essential for the blast furnace operation, being responsible for the batch calling, besides supplying another data and parameters for special analysis. The CSN's BF#3 has got two burden level probes type eletro-mechanics and two probes radar of microwaves. This paper shows the experience of CSN in the specification, project and use of the burden level microwaves radar systems for blast furnace. The microwaves probe radar for the burden level measurement in the blast furnace is a technology that intends to substitute and overcome the eletro-mechanical level probes. Due to its high cost and vulnerability the high temperatures at the top of the blast furnace, the probes radar was protected with spherical valves of isolation against high temperature and lack of nitrogen for purge and refrigeration. The isolation valve command was interlocked through PLC as the signs of flaws of the probes and of low flow of the flow meters. The philosophy adopted for the safety operation of the radar probes took into account the possibilities of PLC CPU crash, power electric failure, nitrogen failure and removal of the probes for maintenance. The functionality of the new radar probes, allied the reliability of the new interlock system, already showed for several times its effectiveness and acting measuring levels before inaccessible under adverse conditions of blast furnace operation.

Key words: Blast furnace; Top; Burden level measurement; Radar probe.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Engenheiros de Manutenção Sênior – Companhia Siderúrgica Nacional – nadur@csn.com.br

³ Engenheiro Especialista em Alto forno – Companhia Siderúrgica Nacional;

⁴ Técnicos Eletricista e Controle de Processos – Companhia Siderúrgica Nacional;

⁵ Engenheiro Especialista - Wadeco;

1 INTRODUÇÃO

As sondas de nível da carga do topo são responsáveis pela chamada de *Batches* de minério e *Coke* do *Stock-house*, sendo imprescindíveis para operação do forno. A medição do nível da carga é essencial para a operação do alto forno, além de fornecer parâmetros para análise de outros dados. O Alto Forno#3 da CSN possui duas sondas de medição de nível tipo eletro-mecânicas e duas tipo radar de microondas. Este trabalho aborda a experiência da CSN na especificação e projeto dos sistemas de medição de nível tipo sonda radar de microondas.

A sonda Radar é a substituto tecnológico para as sondas de medição eletro-mecânicas que possui elevado Índice de Manutenção devido às partes mecânicas móveis. As primeiras sondas com semicondutores de microondas foram Instaladas em novembro de 1973 no BF5 pela Paul Wurth na empresa Hoesch em Huettenerwerke na Alemanha.

2 FUNCIONAMENTO DAS SONDAS DE NÍVEL ELETROMECÂNICAS

A Figura 1 ilustra a pêra da sonda eletro-mecânica dentro do AF#3, bem como outras sondas tais como as quatro sondas de temperatura fixa e o local de instalação da futura sonda penetrante.

Um motor elétrico comanda um conjunto de redutores e um dromo de 6". A pêra é suspensa por uma corrente enrolada neste dromo com 50 ranhuras radiais em volta de uma circunferência. A tensão do cabo é feita pelo peso da pêra. Quando a pêra desce e atinge a superfície da carga do forno, a tensão na corrente afrouxa, diminuindo o peso e atuando uma chave limite. Depois deste afrouxamento momentâneo da corrente, a chave limite comanda a reversão do motor e retorna a pêra para sua posição original de resguardo.

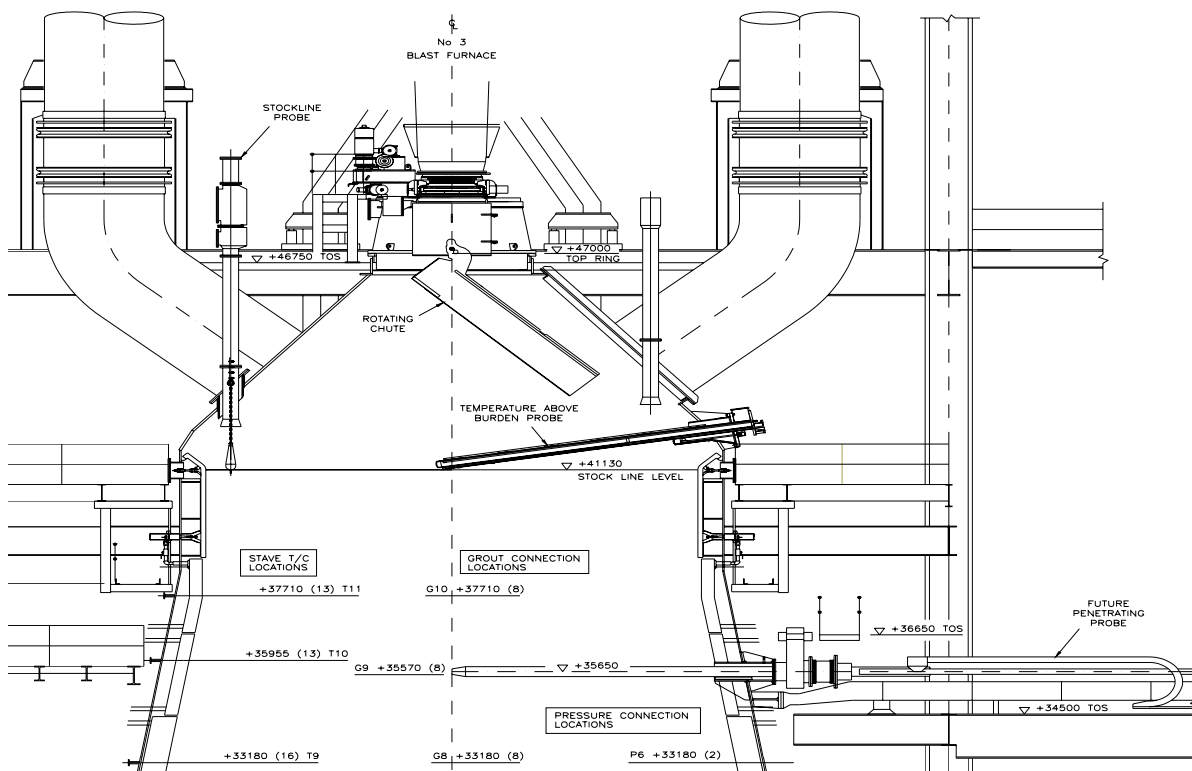


Figura 1 – Pêra da sonda eletro-mecânica e sondas de temperatura fixa do AF#3;

O *Set-point* de nível da carga é definido pelo operador em relação ao *Stock-line Level*. Quando a carga descer devido ao derretimento do material, e o valor medido pela sonda que repousando sobre o material for maior que o nível da carga, uma nova descarga de material é autorizada automaticamente pelo PLC.

Assim que este nível é atingido, o PLC emite um sinal de recolher sonda para o CCM que por sua vez reverte o sentido de rotação do motor.

3 UTILIZAÇÃO DE SONDA RADAR NA SIDERURGIA

Os transmissores de nível tipo radar usam ondas eletromagnéticas, tipicamente na banda – X (10 GHz) de microondas, para efetuar uma medição contínua de nível de sólidos ou líquidos. A maioria das aplicações é para nível de líquidos, ou ainda se a carga a ser medida é metálica com dimensões médias maiores que 12 mm, conforme comenta Liptak^[1] na pág. 356. No AF, os tamanhos médios das matérias-primas, Sinter e Coque, variam respectivamente, de 16 a 20 mm e de 41 a 63 mm.

Na siderurgia, existem aplicações especiais para medição de nível com sonda radar , segundo Devine,^[2] Paul Wurth^[3] e Ferreira e outros:^[4]

- Carga dentro do alto-forno;
- De ferro gusa dentro de carros torpedo;
- Escória e aço líquido em conversores, com lança de oxigênio;
- Aço líquido em fornos a arco;
- Escória e aço líquido em panelas; e
- Nível de coque em baterias.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MEDIÇÃO DENTRO DE UM ALTO FORNO

No caso do AF, tem-se que levar em consideração duas situações indesejáveis: reflexões ou ecos falsos, e o erro provocado pela a pressão e temperatura na velocidade de propagação da onda dentro do gás de alto forno.

As principais reflexões ocorrem nos equipamentos internos do topo, a saber:

1. Calha distribuidora;
2. Pernas de gás;
3. Sondas de temperatura fixa;
4. Rugosidade e empenamento do tubo guia;
5. Armadura fixa.

As reflexões afetam principalmente a amplitude do sinal recebido medido pela relação Sinal/Ruído, ou *Signal/Noise Relation: S/N*. Tipicamente, seu valor tem que **ser maior que 7**, e pode cair abaixo disto, devido a uma atenuação do meio de propagação ou uma segunda reflexão de grande intensidade.

As interferências ocorrem na precisão da medida pois a pressão e a temperatura bem com a rigidez dielétrica do gás de alto forno reduzem a velocidade de propagação usada no calculo da distancia através do tempo de vôo da onda.

4.1 Influência da Pressão e Temperatura na Precisão da Sonda

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo é dada pelas equações de Maxwell:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \times \epsilon_0}}$$

Para ambientes diferentes do vácuo, temos:

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 \quad \epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$$

Como os gases de alto forno possuem $\mu_r=1$, então V_p depende praticamente da permissividade elétrica. Assim,

$$V_p = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Porém, a permissividade elétrica depende da pressão e temperatura dos gases do topo do AF, segundo a equação obtida de Devine [2] abaixo:

$$\epsilon_r = 1 + (\epsilon_{rN} - 1) \times \frac{\theta_N \times P}{\theta \times P_N}$$

Onde:

$\epsilon_{rN}=1,00985$ p/ CO₂ (Pior ϵ_{rN});

$\theta_N = 273$ °K;

$P_N = 1$ Bar abs.;

$P = P_{BF\ TOP} = 2,5$ kgf/cm² $\approx 2,45162$ Bar gauge $\approx 3,45162$ Bar abs.;

$\theta = 100$ °C = 373 °K;

Então:

$$\epsilon_r = 1 + (1,00985 - 1) \times \frac{273 \times 3,45162}{373 \times 1} = 1,02488$$

O que nos fornece:

$$V_p = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{1,02488}} = 2,9618 \times 10^8 [m / s]$$

Portanto, o erro percentual na medida da altura da carga pela sonda radar deve-se a variação da V_p em relação a velocidade da luz no ar. Se fosse no vácuo, e depois alto forno:

$$\text{Erro} = 1,01 \%$$

5 RADAR DE ONDA CONTÍNUA MODULADA EM FREQUÊNCIA (FM-CW)

O radar emite uma Onda Contínua Modulada em Frequência. A vantagem desta técnica em processos variáveis, é que ela usa as informações das frequências, com propriedades diferentes das modulações em amplitude (AM), ganhando maior exatidão na conversão do sinal.

A Figura 2 ilustra o diagrama em blocos do Radar de Onda Contínua Modulada em Frequência por uma onda tipo dente-de-serra, ilustrado Devine ^[3]. O radar mede a diferença entre as frequências das ondas transmitidas (F_2) e recebidas (F_1) pela antena Cônica, que é proporcional ao tempo de vôo da onda. A distância medida é obtida indiretamente.

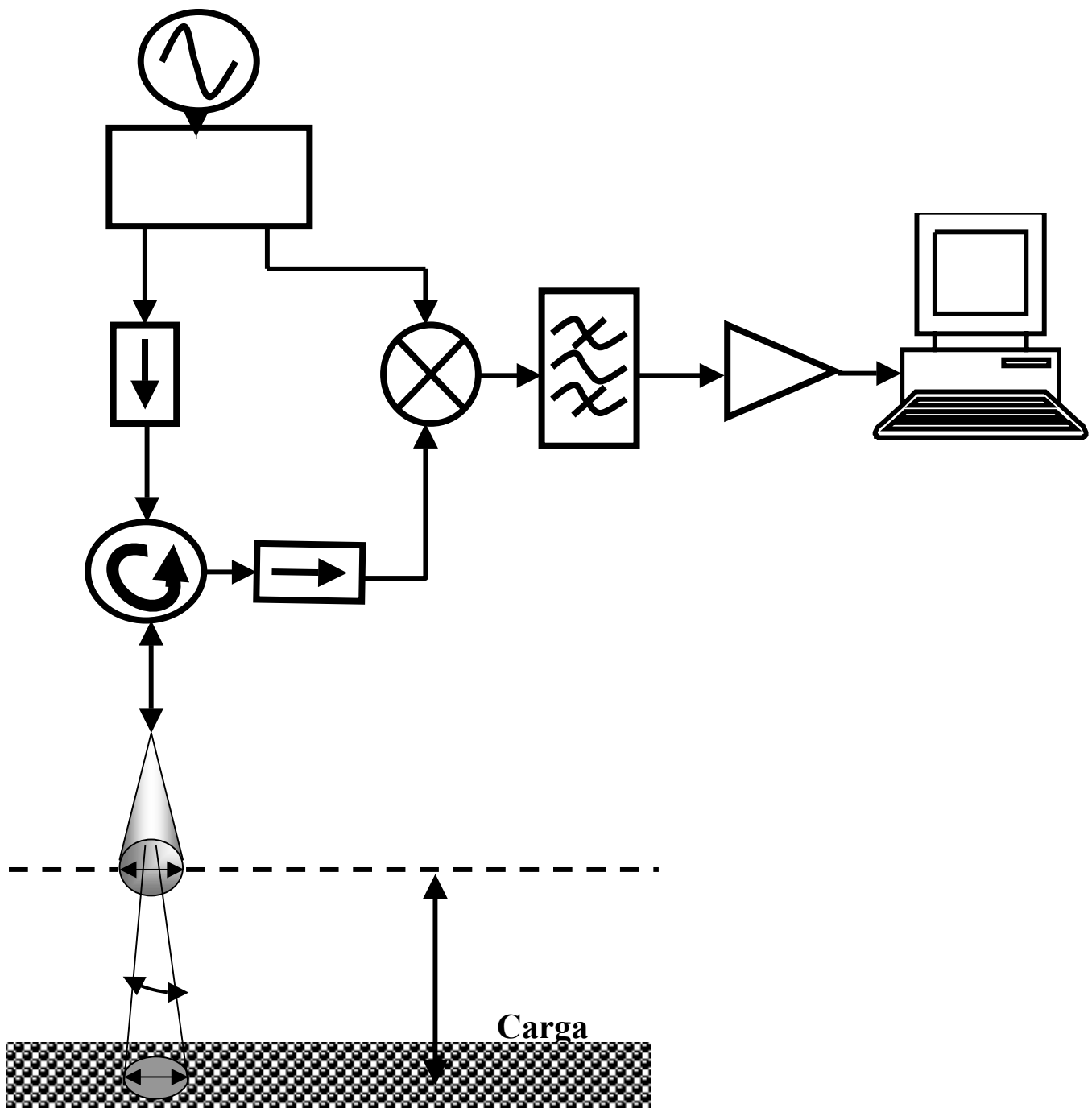


Figura 2 – Diagrama em Blocos da Sonda Radar (FM-CW) e *Footprint* na Carga;

5.1 Determinação da Altura (H) a Ser Medida

A Figura 3 ilustra a onda dente de serra modulada, bem como as ondas transmitidas (F2) e as ondas refletidas recebidas (F1) pelo radar, conforme obtido de Hartnett.^[5]

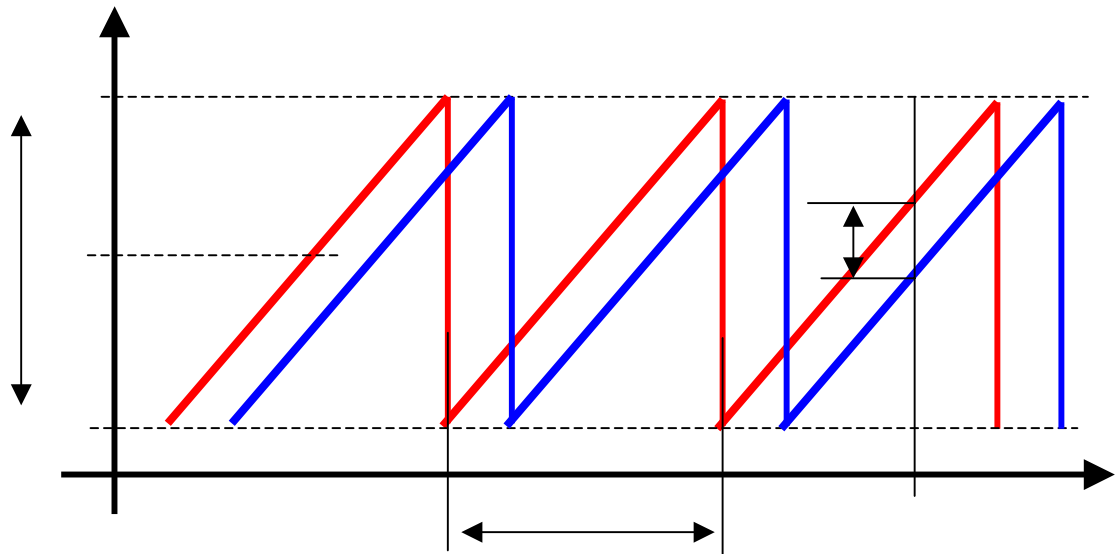


Figura 3 – Características dos sinais transmitidos e recebidos pelo radar;

A altura H em metros da Figura 2 pode ser determinada de acordo com a equação 1:^[5]

$$\Delta F = \frac{Bw \times 2 H}{Ts \times Vp} \quad (1)$$

Onde:

ΔF = Diferença de frequência (F2-F1) entre as ondas transmitidas e recebidas;

F_c = frequência central ou frequência da portadora do transmissor (20 GHz);

Bw = $F_{\text{máx}} - F_{\text{mín}}$ = Largura de banda do radar;

V_p = Velocidade de propagação da onda no gás de alto forno;

T_s = Tempo de varredura do radar;

A velocidade de propagação da onda no gás de alto forno é menor que a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 [m/s]) devido a permissividade dielétrica relativa do gás de alto forno, composto principalmente por CO e CO₂, ligeiramente maior que 1.

Exemplo:

$\Delta F = 16,8$ kHz;

$B_w = 22 - 18$ GHz = 4 GHz;

$T_s = 100$ ms = 0,1 s;

$V_p = 2,9618 \times 10^8$ m/s;

O cálculo da Altura H produz a faixa de medição, em função da diferença de frequência recebida, na fórmula (1) nos fornece como exemplo, H= 63 metros.

A transformada Rápida de Fourier (FFT) é usada para converter os sinais no domínio do tempo da Figura 2 em amplitude versus frequência. Isto produz um espectro de frequência dos ecos recebidos. e então amplitude versus distância. Um algoritmo de detecção do valor de pico é usado para no gráfico do domínio da frequência para se obter a distancia H.

5.2 Considerações sobre o Sinal Amostrado

O feixe de microondas projeta uma sombra na carga conhecida como "Footprint", tal como ilustrou a Figura 2. O cálculo do diâmetro do círculo projetado pelo feixe de microondas na superfície do material é obtido com o auxílio da fórmula (2), a seguir:

$$D = d + 2*H*\tan(\beta) \quad (2)$$

Onde:

D = diâmetro projetado pelo feixe de microondas a uma dada altura H;
d = diâmetro da antena;
H = distância da antena até um ponto dentro do alto-forno;
 β = angulo do feixe de microondas;

Para a antena cônica temos: d = 136 mm
 β = 3.5 graus
 $\tan(\beta)$ = 0,0611

Exemplos:

Para H = 1 m = 1000 mm, temos:

D= 258 mm = 0,258 m

Para H = 27 m = 27000 mm, temos:

D= 3438 mm = 3,438 m

O radar Wadeco não é influenciado por reflexos duplos das microondas e portanto, mesmo que as microondas atinjam as paredes do forno, o que certamente acontecerá em alguns casos, isso não afetará a medição.

6 DIFICULDADES ENCONTRADAS

As sondas Radar de 10 [Ghz] foram implantadas durante a reforma do AF#3 em 2001, foram projetadas para a medição de 0 a 27 metros. Foram utilizadas sondas projetadas inicialmente para conversores de Aciaria visando obter os níveis das laminas de aço e escória.

As reflexões nas quatro sondas de temperatura fixa exigiram que a faixa de medição fosse reduzida, de 0 a 7 para de 0 a 6 metros visando limpar a densidade espectral resultante.

A proteção contra sobre temperatura era um disco de cerâmica e o nitrogênio de purga. Havia a necessidade de micro computador auxiliar para tratar os dados adquiridos da sonda via RS-485. Este "rack" possuía fontes de alimentação,

módulos de aquisição de dados e conversores RS232/485 e envia 4 a 20 mA para o PLC do AF#3.

Estas sondas foram destruídas no acidente de janeiro de 2006, devido a falta de nitrogênio de purga e refrigeração, sendo que o disco refratário não foi suficiente para proteger os circuitos eletrônicos das duas sondas.

7 NOVAS DIRETRIZES PARA O PROJETO DAS SONDAS RADAR

A – Consultar novos fornecedores: WADECO, Aggelis e Paul Wurth e Siemens avaliando o custo x benefício e as aplicações na indústria mundial;

B – Informar o “lay-out” interno do forno, e as condições da sonda fixa de temperatura aos fornecedores;

C – Projetar um dispositivo contra sobre temperatura, e falta de nitrogênio de refrigeração;

D – Especificar rotâmetros para controlar a vazão de N₂ de refrigeração;

E – Conectorizar os cabos da sonda, válvula de isolamento, comunicação para facilitar a manutenção e a remoção da sonda, especialmente a sonda 2 sobre o janelão do AF#3;

F – Aumentar a frequência do sinal de microondas, visando diminuir a dispersão do feixe para evitar as reflexões sondas fixas de temperatura.

8 A SONDA RADAR ESCOLHIDA

Após a consulta internacional e baseada em nossas experiências anterior e a experiência de Ferreira e outros,^[4] a sonda radar escolhido foi projetado especialmente para atender as condições do AF#3 da CSN.

O modelo é o MUS-20RFB projetado pela Wadeco ^[5]. A unidade eletrônica é auto suficiente e não requer microcomputador para processar a FFT “online”. Apenas um notebook para ajustes iniciais de parâmetros e monitorações periódicas.

9 SISTEMA IMPLANTADO

A Figura 4 ilustra o sistema implantado no topo do Alto forno #3 da CSN. A sonda radar foi instalada sobre a válvula de isolamento tipo esfera que repousa na carcaça do topo do AF#3.

A caixa eletrônica possui refrigeração com nitrogênio limpo e seco em 0,5 Nm³/h. Foram incorporados ao PLC os sinais da válvula de isolamento, bem como os sinais dos demais acessórios.

O sinal de falha de sonda que significa temperatura maior que 60°C comanda o fechamento automático da válvula de isolamento. Os rotâmetros servem para controlar o fluxo assim como emitir alarme na tela do PLC em caso de fluxo menor que 20 m³/h. Eles também intertravam o fechamento automático da válvula de isolamento.

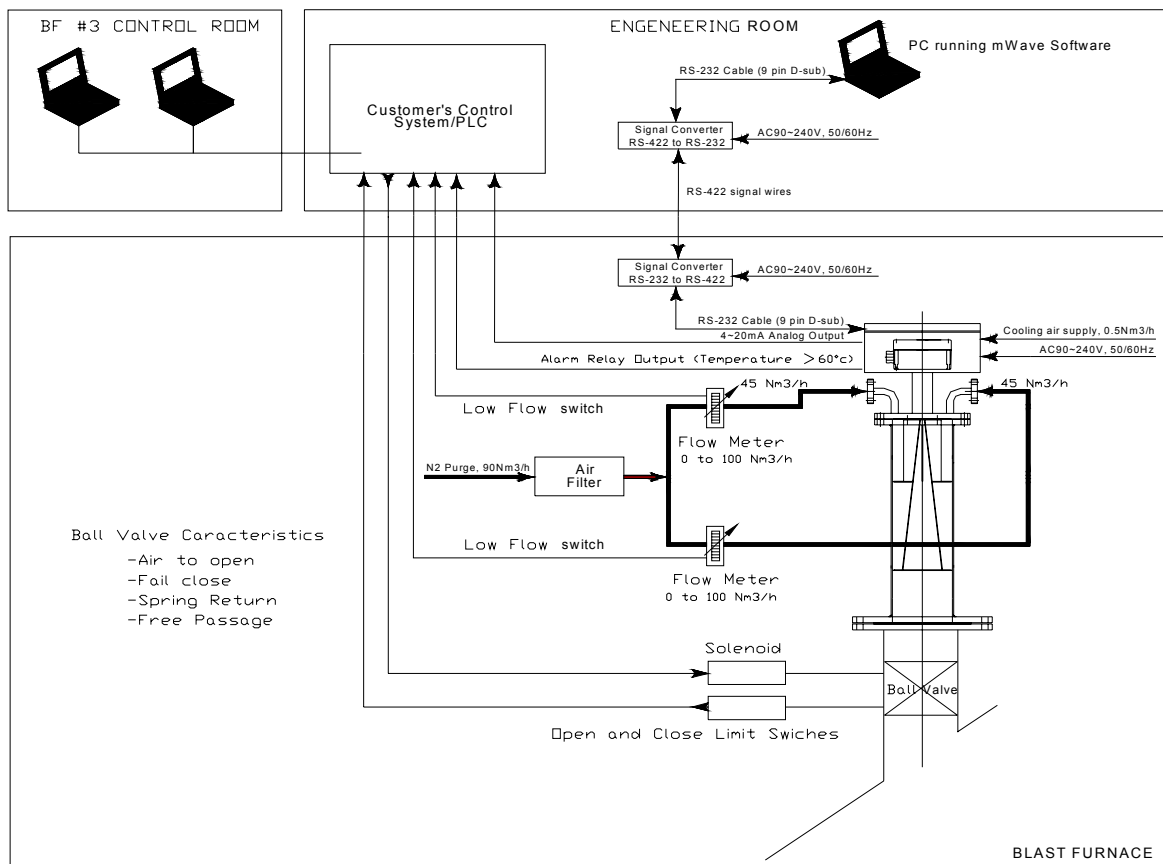


Figura 4 – Sonda Radar WADECO instalada no AF#3 da CSN;

9 OPERAÇÃO DAS SONDAS DE NÍVEL DO TOPO DO AF # 3 DA CSN

A seleção da sonda em comando para chamada automática de *batches* do “stock-house” pode ser feita como a seguir:

- A média das sondas em serviço;
- A sonda de nível mais baixa;
- Sonda mestre (1, 2, 3 ou 4) para comandar a descarga de *Batch*.

A chamada de *Batch* do *Stock-house* em automático pode ser feita eletricamente de dois modos:

- Modo analógico – Utiliza os sinais de 4 a 20 mA, gerados pelas sondas radar ou eletro-mecânicas;
- Modo digital – Utiliza uma entrada digital acionada por uma chave CAME, usada nas sondas eletro-mecânicas.

O botão Fonte de alimentação liga ou desliga o circuito de comando das sondas eletro-mecânicas (1 e 3), que possuem os seguintes estados de operação:

- Auto – Opera conforme a seqüência do forno;
- Manual – Operação (subir / descer) via sala de controle;
- Pausa – Sonda fora de serviço (em manutenção);
- Local – Sonda fora de serviço pronta para operação pelo painel local.

Para operação da sonda radar, foram definidos os seguintes comandos:

- Auto - Operação continuamente;
- Pausa – Sonda radar em manutenção;
- Abrir – Abre a válvula de isolamento da sonda radar;
- Fecha – Fecha a válvula de isolamento da sonda radar.

A seleção da sonda mestre em comando, bem como a natureza do sinal, podem ser efetuadas na tela gráfica, tal como ilustra a Figura 5 abaixo:



Figura 5 - Tela gráfica de operação das sondas de nível do topo do AF#3 da CSN;

10 COMPARAÇÃO ENTRE AS SONDAS RADAR E ELETRO-MECÂNICAS

Tabela 1 - Comparação Sonda Radar x eletro-mecânicas instaladas no AF#3;

Sonda Eletromecânica	Sonda Radar WADECO
Não necessita de refrigeração	Necessita 90 [m ³ /h] de nitrogênio
Desgaste de partes mecânicas com o tempo	Não possui partes mecânicas
Sonda precisa ser recolhida durante a descarga	Medição contínua: De 100 em 100 [ms]
Não é susceptível a temperatura	Tem que ter válvula de isolamento para proteção contra sobretemperatura
Faixa de Medição: 0 a 6 metros	Faixa de Medição: 0 a 27 metros
Elevado índice de Manutenção	Menor índice de Manutenção
Vida Útil : 20 anos	Vida Útil: 20 anos
Precisão: +- 100 mm;	Precisão: +- 30 mm; 3 vezes melhor!
Aferição: 6 em 6 meses;	Aferição: 6 em 6 meses;
Custo Manutenção: 12 Hh a cada 3 meses para reparos	Custo de Manutenção: 2 Hh por semana para inspeção
Custo: 200 a 250 mil US\$	Custo: 70 a 90 mil US\$

11 EVOLUÇÃO DAS SONDAS RADAR

A Tabela 2 ilustra uma comparação da evolução tecnológica sofrida pelos dispositivos de detecção de nível tipo radar para alto forno.

Tabela 2 – Evolução Tecnológica das Sondas Radar para Alto-forno;

Sonda Radar – Década de 70 a 90	Sonda Radar – Após 2005
Precisa de Microcomputador “On-line” para efetuar análise dos sinais adquiridos	Não precisa de microcomputador. Usa-se apenas um “Notebook” para parametrização
Precisão Sobre Superfície Lisa: +- 30 mm	Precisão Sobre Superfície Lisa: +- 5 mm
Precisão Sobre Carga do Alto-forno: +- 50 mm	Precisão Sobre Carga do Alto-forno: +- 30 mm
Faixa de Medição Máxima: 0,3 a 16 m	Faixa de Medição Máxima: 0,5 a 70 m
Frequências típicas: 11 a 12 Ghz	Frequências típicas: 20 a 30 Ghz
Proteção Contra Sobretemperatura: Disco de Cerâmica ou Válvula motorizada.	Proteção Contra Sobretemperatura: Sinal de Temperatura e fluxo baixo de nitrogênio para intertravamento da Válvula Esfera de Isolamento.

12 CONCLUSÕES FINAIS

As principais recomendações e vantagens das novas sondas radar são:

- Não precisa limpar nunca a cerâmica de proteção da antena;
- A pressão do N₂ tem que ser no mínimo 4 bar e vazão de 90 m³/h;
- A sonda radar tem que ser protegida contra temperatura alta > 60 °C;
- A microonda dispersa um pouco, por isso não pode colocar próximo a parede do alto forno;
- Alta precisão e repetibilidade para faixas de medição entre 2 e 60 metros;
- Não efetua contato com a carga do AF, e, portanto, não perde a “pêra”.

REFERÊNCIAS

- 1 Liptak, B.; Daniewicz, J.L. Instrumentation Engineer Handbook – 1994 – EUA; Radar Level Transmitters and Gauges - Item 3.13 – PG 351 to 356 -
- 2 Devine, Peter. Radar Level Measurement – The User’s Guide – 2000 - Vega Controls, Ltd – UK;
- 3 Radar Level Gauge - Paul Wurth / Luxemburgo – 19/07/1996;
- 4 Ferreira, C.G., Santos J.M.; Lima, M.J.B.O.; Cruz Júnior, R.; Lobão T.A.; Loyola, W.P.; Faria, J.A.; Novaes, J.A .P.; Medição Contínua do Nível de Gusa dos carros Torpedo na Área dos Altos-fornos da CST com Aplicação de Dispositivos Radares. 61º Congresso da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, 24 a 27 de Julho de 2006 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.
- 5 Hartnett M.; Kurose, Kayano - Range Finder Manual - Model: MWS-20RF-B
- 6 WADECO - Wire Automatic Device CO. LTD. – Japão; www.wadeco.co.jp - 07 de Julho de 2006.