

SISTEMA DE AFERIÇÃO 2D DE TEMPERATURA DE GÁS DE TOPO DE ALTO-FORNO – SOMA¹

Marc Tonteling²
Harald Rausch³
André Oliveira⁴
Claude Bodeving⁵

Resumo

Um sistema novo, confiável, não-invasivo e virtualmente sem requisito de manutenção para a aferição da temperatura de gás de topo de alto-forno, (SOMA: *SONic MApping*), baseado em tomografia acústica, é apresentado pela TMT. O sistema é capaz de medir a distribuição 2D completa da temperatura de gás de topo sem nenhum desvio ao longo do tempo. Transdutores são instalados na parede do alto-forno abaixo do cone de topo sem que nenhum componente penetre a área da carga, eliminando quaisquer distúrbios no carregamento. O sistema pode ser integrado a altos-fornos existentes ou novos sem quaisquer problemas. Além disso, ele rastreia a posição do canal central de gás e detecta canais secundários ou nas paredes, abrindo caminho para vários outros métodos de avaliação de temperatura do gás, impossíveis com sondas de temperatura convencionais.

Palavras-chave: Alto-forno; Gás de topo; Medição de temperatura de gás; Acústica.

2D BLAST FURNACE TOP GAS TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM – SOMA

Abstract

A new, reliable, non-invasive and virtually maintenance free top gas temperature measurement system (SOMA: *SONic MApping*) based on acoustic tomography is presented by TMT. The system is able to measure the complete 2D top gas temperature distribution without any drift over time. Transceivers are installed in the blast furnace wall below the top cone without any components penetrating into the burdening area, eliminating any charging disturbances. The system can be integrated into existing and new blast furnaces without any issues. The system tracks the central gas channel position and detects secondary and wall channels and opens the way to several other gas temperature evaluation methods, not possible with conventional above burden temperature probes.

Key words: Blast-furnace; Top gas; Top gas temperature measurement; Acoustic.

¹ *Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Mestre. Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento, TMT Tapping Measuring Technology S.à.r.l. Luxemburgo, Luxemburgo.*

³ *PhD. Pesquisa e desenvolvimento em metalurgia e processos siderúrgicos, Dillinger Hüttenwerke. Dillingen, Saarland, Alemanha.*

⁴ *Analista de Sistemas. Analista de processos metalúrgicos, Paul Wurth do Brasil Ltda. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

⁵ *Mestre. Diretor executivo, TMT Tapping Measuring Technology S.à.r.l. Luxemburgo, Luxemburgo.*

1 INTRODUÇÃO

SOMA é um sistema de medida de temperatura de gás de topo de alto-forno inovador, robusto e não-invasivo, desenvolvido pela TMT. SOMA vem de SONic MApping (mapeamento sônico). O seu princípio de medição é baseado em medição acústica de temperatura complementada com uma representação 2D de temperatura baseada em tomografia. Oito transceptores são instalados na carcaça do alto-forno abaixo do cone de topo sem nenhuma inserção de componentes na área de carregamento, o que evita quaisquer distúrbios de carregamento. O sistema não requer quase nenhuma manutenção. As temperaturas individuais dos caminhos, assim como a distribuição 2D, fornecem aos operadores de forno novas possibilidades de análises de processo, impossíveis com as sondas de temperatura convencionais. A primeira parte deste trabalho descreve, brevemente, o sistema de medição, seguida da descrição de uma instalação industrial e de uma seção focando as diferenças e vantagens do SOMA comparado a câmeras para o cone de topo do alto-forno. A segunda parte do trabalho trata da aplicação do sistema de medição acústica de temperatura de gás em altos-fornos e as medições resultantes. Nessa parte, várias novas possibilidades de análise do SOMA, tais quais o rastreamento do canal central de gás e a detecção de canais secundários e de parede são apresentadas. Todos os dados apresentados neste trabalho são provenientes do sistema SOMA operando no AF4 da Rogesa Dillingen.

A tecnologia de tomografia acústica para a medição de temperatura de gás tem sido usada há mais de 15 anos em caldeiras à carvão⁽¹⁾ e plantas de incineração de resíduos.⁽²⁾ Tal sistema foi testado em um alto-forno pela primeira vez por Bonnenberg und Drescher e Thyssen Krupp na TKS Hamborn, na Alemanha.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Sistema de Medição por Tomografia Acústica (SOMA)

2.1.1 Princípio da medição acústica da temperatura de gás

Vários transceptores acústicos são posicionados ao redor da carcaça do alto-forno para emitir e receber sinais acústicos. O tempo de percurso (tempo de vôo) entre os transceptores através do gás de alto-forno são medidos para cada caminho. Um caminho é definido pelo segmento reto entre dois transdutores. A relação entre a velocidade do som e a temperatura do gás é baseada na Equação 1.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} \quad (1)$$

Na Equação 1, γ é o índice adiabático do gás, R é a constante universal dos gases perfeitos, c é a velocidade do som, T é a temperatura absoluta e M é a massa molar do gás. O índice adiabático e a massa molar do gás de alto-forno são considerados constantes, o que é uma suposição válida e que foi demonstrada em estudos prévios.^(3,5) Usando a Equação 1, a temperatura do gás pode ser relacionada à velocidade do som ou, nesse, caso, ao tempo de vôo τ do sinal acústico. A equação pode ser reescrita conforme a Equação 2.

$$T = \frac{M}{\gamma \cdot R} \cdot \frac{l^2}{\tau^2} \quad (2)$$

Na Equação 2, l é o comprimento do caminho do sinal acústico, referente à distância entre dois transceptores correspondentes. Maiores detalhes acerca da relação entre a temperatura e o tempo de vôo foram tratados em vários trabalhos prévios^(3,4) e não serão repetidos no presente trabalho.

2.1.2 Tomografia acústica

Na Figura 1, a seqüência típica de medição do SOMA é ilustrada. Os transceptores são indicados por pontos; pretos quando emitindo e cinzas quando recebendo. Os caminhos acústicos são indicados por linhas pontilhadas. Um a um, cada transceptor emitirá som enquanto todos os outros “escutam”. O tempo de vôo τ é medido para cada caminho utilizando as informações acústicas gravadas pelos transceptores. Cada caminho é medido duas vezes: uma vez no sentido direto e outra no reverso. Um ciclo é encerrado uma vez que todos os transceptores tenham emitido.

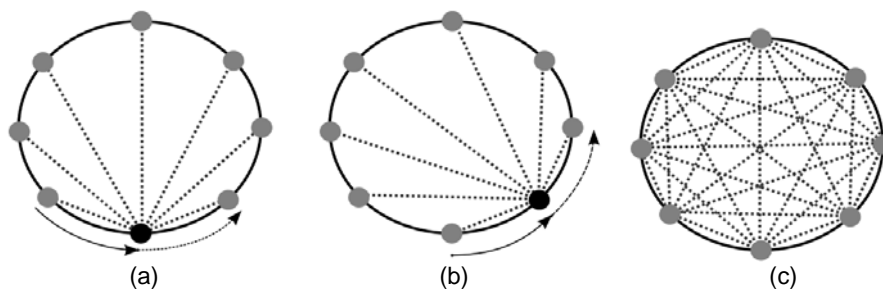


Figura 1. Exemplo ilustrando a seqüência de medição do sistema SOMA. Os pontos representam os transceptores. Um primeiro transceptor está emitindo enquanto os outros “escutam” (a). Sete temperaturas de caminho são medidas ao mesmo tempo. Após uma pequena pausa, o próximo transceptor emite, resultando em 7 novas temperaturas de caminho (b). O ciclo é completo quando todas as 28 temperaturas foram medidas duas vezes (c).

Uma vez que todas as temperaturas de caminho forem medidas, um algoritmo de tomografia transformará os dados medidos em um mapa bidimensional de temperatura (Figura 2). Essa distribuição 2D de temperatura é atualizada cada vez que novos dados de caminho são disponibilizados.

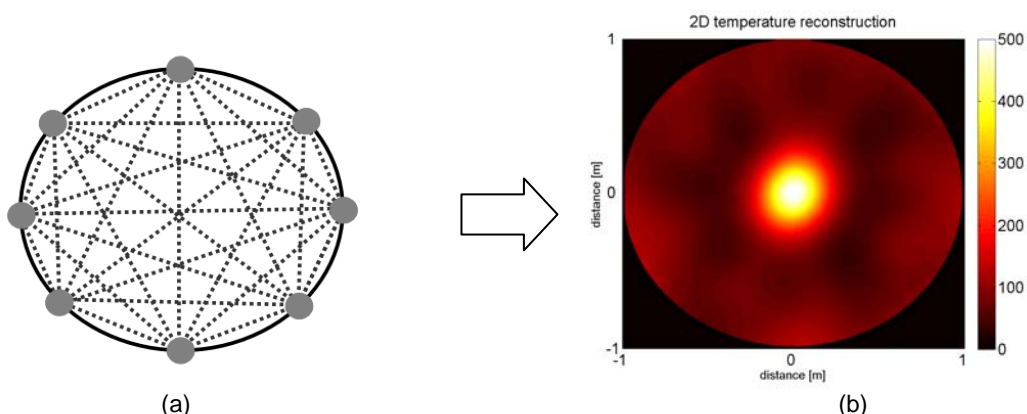


Figura 2. Um algoritmo de tomografia especialmente desenvolvido transforma a temperatura de caminho em uma distribuição 2D completa de temperatura .

O algoritmo de tomografia atual do SOMA foi especialmente desenvolvido pela TMT para as condições do alto-forno em estreita colaboração com operadores de forno da Dillinger Hütte. O sistema opera sem nenhum distúrbio do padrão de carregamento uma vez que os transceptores são instalados dentro da parede do alto-forno.

O sistema continua a funcionar quando um transceptor falha. Um caminho acústico faltante será ignorado pelo algoritmo de tomografia e uma representação 2D de temperatura continua possível. A perda de um transceptor levará, portanto, apenas a uma redução temporária da resolução espacial do sistema. Esse transceptor pode ser substituído ou reparado durante a próxima parada programada de forno.

2.2 Comparação do Sistema Acústico Soma com Outros Sistemas de Medição de Temperatura

A grande vantagem da medição acústica da temperatura de gás é que a temperatura absoluta é medida sem interferências de radiação ou quaisquer influências de condução térmica. A medição é direta, uma vez que ela mede uma propriedade física do gás que depende da temperatura – a velocidade do som.

Em contraste, termopares medem uma variação de voltagem dependente do material do termopar e da temperatura. Assim, a temperatura do termopar em si tem de adotar, de uma forma ou outra, a temperatura do gás. Na lista a seguir, várias vantagens do método acústico, comparado à medição com termopares, são descritos:

- a temperatura verdadeira do gás é medida através da velocidade do som. O tempo de traslado do sinal é o valor medido;
- o sistema não tem nenhuma inércia, então variações da temperatura do gás são detectadas instantaneamente;
- a temperatura não é influenciada por radiação da carga ou paredes laterais;
- a temperatura não é influenciada por condução (por exemplo: uma sonda resfriada de temperatura sobre a superfície da carga pode influenciar a temperatura dos termopares);
- a medição acústica não será sujeita a desvios no tempo como é, comumente, o caso com termopares. Isso evita incertezas quando as medições são avaliadas e usadas para decisões operacionais do alto-forno;
- definição espacial clara da temperatura medida (linha de vista entre transceptores);
- os componentes do sistema SOMA são muito robustos e não há necessidade de trocar componentes regularmente (como no caso de termopares). O sistema é praticamente isento de manutenção.

Deve ser ressaltado que aferir uma temperatura de gás de topo com câmeras de infravermelho (IV) ou nas proximidades do infravermelho (NIR – Near-Infrared), como é comumente sugerido atualmente, não é possível. Uma medição direta de temperatura de gás com medidas ópticas não é possível. Para tal medição, seriam necessários pirômetros ou câmeras sensíveis no comprimento de onda de absorção do gás de alto-forno.⁽⁵⁾ Tais câmeras captam a radiação da carga ou da parede do forno para estimar temperaturas, com todas as dificuldades conhecidas e fontes de erros. Algumas dessas dificuldades são as emissividades desconhecidas dos diferentes materiais da carga, a absorção desconhecida do gás de alto-forno, a absorção dos equipamentos ópticos em si e, ainda mais complexa, a absorção devido ao acúmulo de poeira nos equipamentos. Tudo isso torna impossível uma calibração absoluta. Outra fraqueza da maior parte dos sistemas com câmeras é o nível mínimo requerido de temperatura na área do cone de topo, acima de 250-300°C, abaixo do qual nenhuma imagem é detectável. Tudo isso aponta para a conclusão que câmeras não são adequadas para a medição da temperatura de gás de topo de alto-forno.

2.3 Instalação

Após a instalação inicial pela TMT em um alto-forno na TKS Hamborn na Alemanha,⁽³⁾ várias outras instalações de sistemas industriais de medição de temperatura de gás de topo de alto-forno foram realizadas. Uma instalação típica é representada na Figura 3.

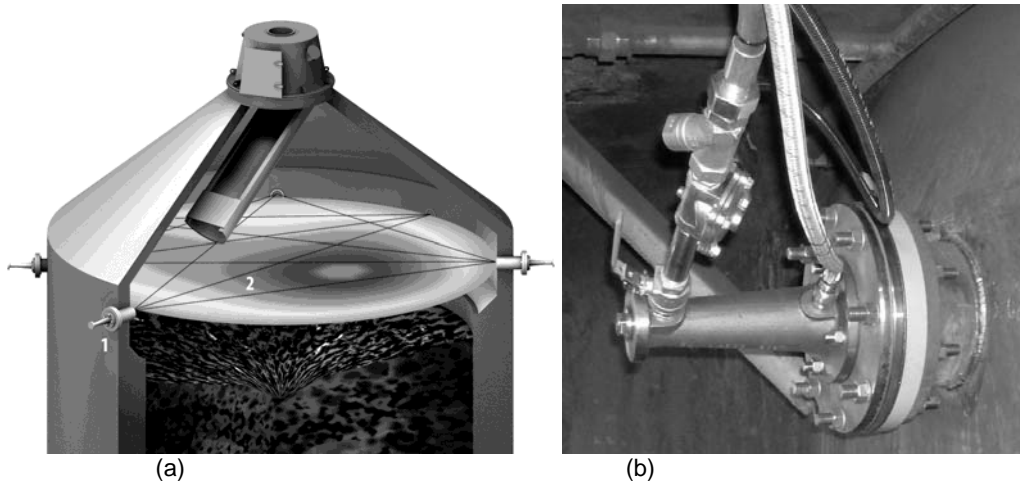


Figura 3. (a) O sistema SOMA é representado montado em um alto-forno. (1) Transceptores acústicos que são, simultaneamente, transmissores e receptores. (2) Linha representando o caminho acústico no qual a temperatura média de gás é medida. (b) Foto de um transceptor instalado.

Os flanges do alto-forno (DN200) podem ser instalados durante paradas curtas do equipamento e o sistema completo pode ser montado e comissionado durante uma parada comum de 8h de duração. Os transceptores devem ser instalados aproximadamente 500 – 1000 mm acima do nível máximo de carga (stockline), ao redor da circunferência do cone de topo. O sistema requer uma alimentação elétrica de 230V e suprimento de nitrogênio pressurizado para produzir o som utilizado na medição das temperaturas. Desde a instalação do sistema SOMA em março de 2011 no AF4 da Rogesa pela TMT, apenas cerca de 4h de manutenção foram necessários, em um período de dois anos de operação.

Durante os últimos dois anos, os estudos conduzidos por Domels, Deuster e Reinitzhuber⁽³⁾ foram confirmados pela TMT em colaboração estreita com a Rogesa. Durante tal colaboração, vários estudos adicionais foram realizados, cujos resultados são apresentados na seção 3 do presente trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentadas novas aplicações e vantagens do uso do sistema SOMA. São introduzidos novos métodos de análise baseados em avaliações de temperatura de caminhos individuais e 2D, tais quais rastreamento de canal de gás, detecção de canais secundários ou periféricos e monitoramento de temperatura de contorno de alto-forno. A validação da medição acústica de temperatura em geral e do sistema SOMA em altos-fornos foi tratada em vários estudos prévios⁽¹⁻⁴⁾ e são omitidas no presente texto.

3.1 Reatividade da Medição Acústica de Temperatura de Gás

Conforme previamente mencionado, a medição acústica de temperatura não possui inércia e aumentos ou reduções de temperatura são medidos imediatamente. A Figura 4 ilustra essa propriedade mostrando um aumento de temperatura de grandes proporções durante a formação de um canal (*chaneling*). A temperatura de um caminho periférico (caminho número 16) aumenta de abaixo de 100°C até 480°C em menos de 1min. É impossível medir uma variação tão rápida com termopares. De fato, esse caminho é localizado exatamente na posição onde a formação do canal começou, conforme pode ser visto na representação 2D de temperaturas mostrada na Figura 9. A temperatura desse caminho cai, então, novamente abaixo de 200°C após a formação do canal. O aumento da temperatura do caminho central (caminho 1), que cruza o centro do alto-forno, também é mostrado na Figura 4, não teve a mesma magnitude. Isso demonstra que a formação de canal começou na periferia sua localização pôde ser determinada analisando detalhadamente as medições do SOMA.

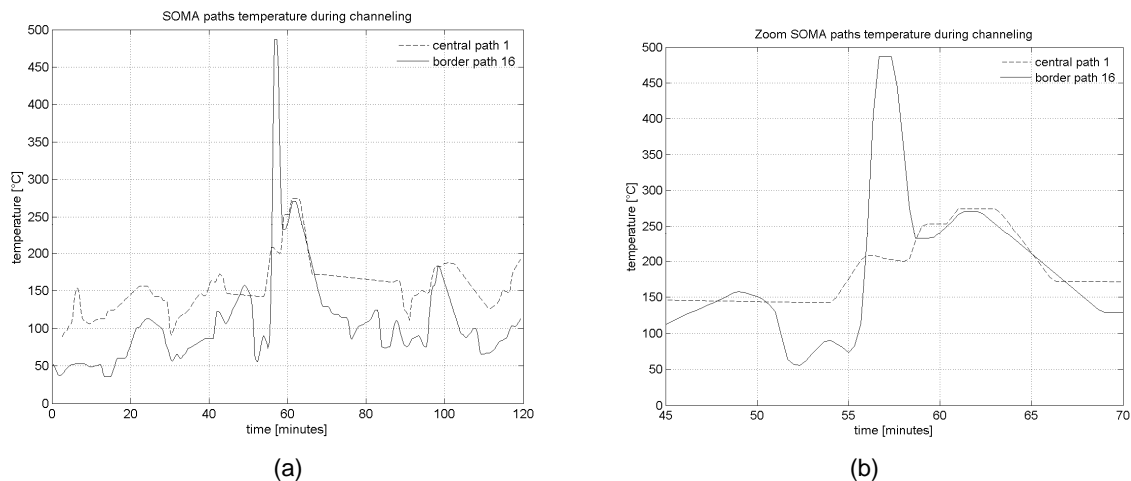


Figura 4. O diagrama mostra temperaturas de caminhos durante um fenômeno de criação de canal. A figura (b) é uma ampliação da figura (a) no momento em que o canal na parede ocorreu (caminho número 16)

3.2 Resultados de Rastreamento de Canal Central de Gás

Um estudo teórico demonstrou que é possível rastrear a posição do canal central de gás. Durante uma avaliação industrial de três dias de duração, foi explicitado que o canal central de gás estava bem centralizado durante a integridade do período de análise. Na Figura 5, a densidade das posições monitoradas do canal central de gás é representada para o período considerado de 72h. A posição média calculada do canal central de gás desviou apenas 1 cm horizontalmente e 8cm verticalmente da posição verdadeira do centro. Em outras palavras, o canal central de gás estava perfeitamente centralizado durante esse período de tempo.

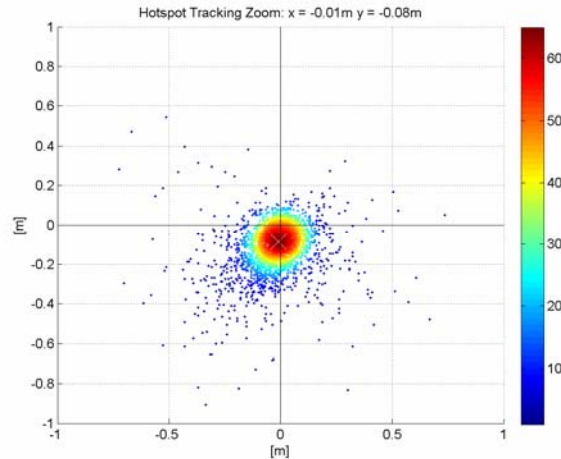


Figura 5. As posições monitoradas do canal central de gás e sua densidade são apresentadas. O raio do alto-forno é 4,35m e a densidade de posições é indicada pela escala de cores. Nesta figura, apenas a parte central do forno é representada.

Temperaturas e posições precisas do canal central de gás podem ser medidas usando o sistema SOMA em um alto-forno. Alternativamente, uma disposição típica é a instalação de duas ou quatro sondas de temperatura sobre a superfície da carga (Above Burden Temperature Probe - ABTP). Em ambos os casos, a cobertura e densidade de medições sobre a superfície são baixas e muito irregulares, sendo especialmente baixas na periferia do forno. Para a configuração com duas sondas, apenas dois pontos na periferia são aferidos. Mesmo com quatro sondas instaladas, apenas quatro pontos individuais são medidos na circunferência completa do alto-forno. Adicionalmente, a localização precisa do canal de gás não é possível. Esse é o caso, por exemplo, quando o canal de gás se move entre as sondas, o que é ilustrado pela Figura 6, um fenômeno pode gerar interpretações incorretas. No caso da utilização de duas sondas, a movimentação do canal de gás só pode ser detectada se o canal de gás se mover ao longo das sondas instaladas. Movimentos em outras direções podem ser equivocadamente interpretados como uma queda de temperatura em combinação com um “aplainamento” do perfil de temperatura. Com quatro sondas de temperatura, apenas grandes movimentações do canal central podem ser detectadas após uma análise detalhada.

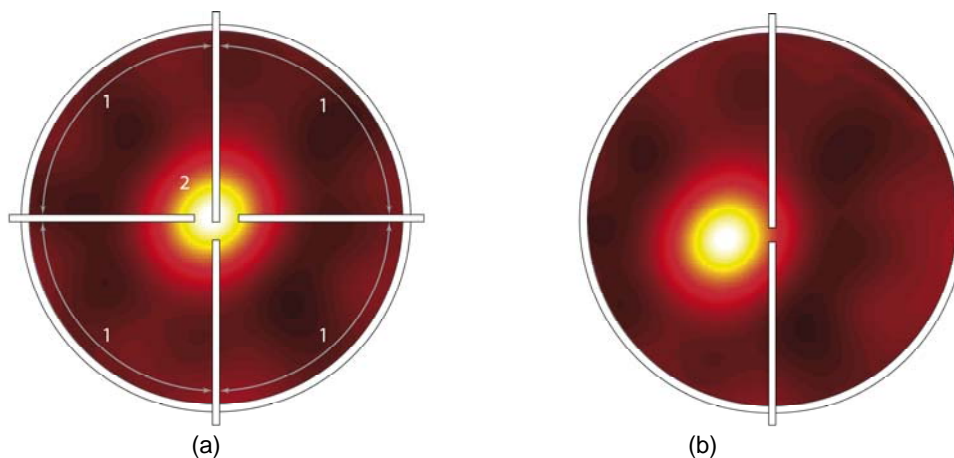


Figura 6. A Figura (a) ilustra a baixa cobertura de medição da periferia do alto-forno mesmo com a utilização de quatro ABTP (1) com um canal central de gás (2). Na Figura (b), é ilustrado que não é possível ter um rastreamento claro do canal de gás utilizando nem duas nem quatro ABTP.

Comparativamente, o sistema SOMA é capaz de determinar exatamente a posição do canal de gás, sem nenhuma restrição geométrica, conforme demonstrado pelos resultados previamente apresentados. Além disso, o sistema possibilita o monitoramento de temperaturas periféricas com uma boa resolução. Nas instalações atuais, a temperatura periférica é medida por 8 caminhos distintos ao longo da circunferência do forno.

3.3 Elevada Cobertura de Medição Sobre a Região Periférica do Alto-Forno

Utilizando uma ferramenta de visualização recém-desenvolvida para as temperaturas dos caminhos da periferia, é possível monitorar, agilmente, a temperatura de gás de topo da periferia do forno ao redor de sua circunferência completa. Na representação, todos os oito caminhos periféricos são representados em um gráfico polar com seu ângulo correspondente. Essa representação permite que o operador tenha uma visão geral dos níveis de temperatura da periferia do forno, sua distribuição e simetria com apenas uma análise. Na Figura 7a o alto-forno está em condições em condições estáveis e, após apenas alguns minutos, (Figura 7b), as temperaturas periféricas começam a aumentar severamente nos dois lados do forno e a distribuição se torna muito assimétrica. Então a formação de canal ocorre ao longo da parede e todas as temperaturas aumentam rapidamente em um nível não usual. Na Figura 7d, o alto-forno está em condições estáveis novamente.

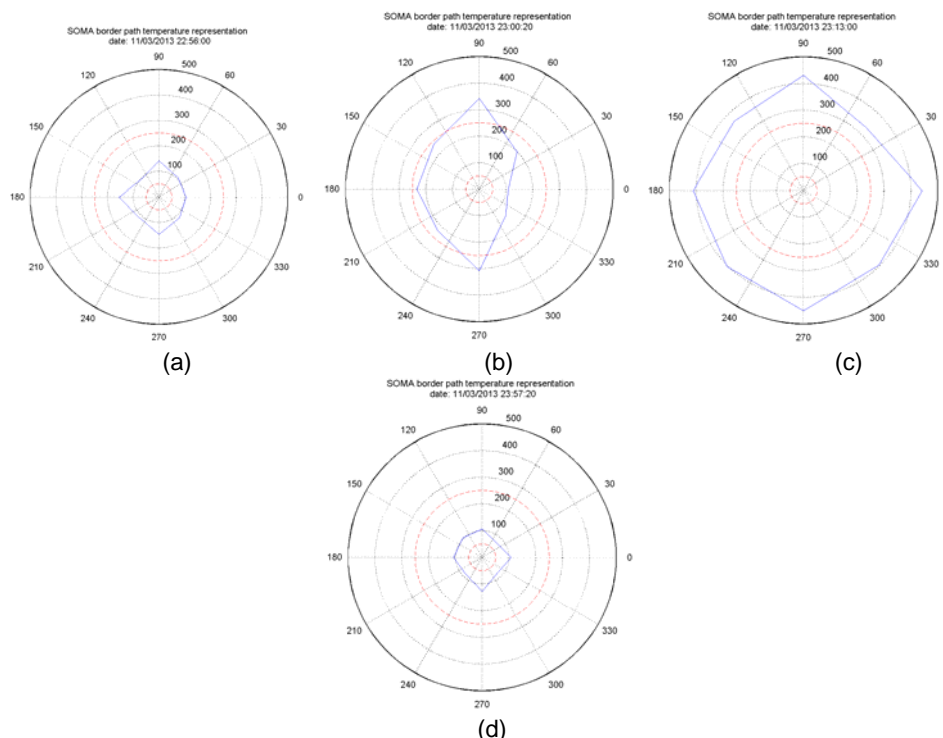


Figura 7. Nesta sequência, as temperaturas dos caminhos periféricos são representadas antes, durante e após a aparição de um canal secundário na parede do forno. Todas as oito temperaturas periféricas são representadas no gráfico polar em seus ângulos correspondentes ao longo da circunferência do forno. Pode ser visto, na figura (b), que a formação de canal começa enquanto as temperaturas periféricas aumentam rapidamente e de maneira assimétrica. Na figura (c) todas as temperaturas de caminho são muito elevadas durante a ocorrência do canal e, na figura (d), o forno retorna à operação estável.

O aparecimento de um canal na região periférica foi verificado através da análise de distribuições 2D de temperatura do SOMA e mostra que o uso dessa ferramenta simples permite aos operadores o monitoramento das temperaturas periféricas do alto-forno e de sua simetria com facilidade.

3.4 Resultados de Detecção de Canal Secundário e Periférico

A habilidade do sistema de tomografia acústica de detectar canais secundários e periféricos de gás foi demonstrada em simulações e é mostrada na Figura 9, baseada em dados reais de um alto-forno. Ocorrências de formação de canais preferenciais foram identificadas e os dados foram analisados em detalhes. Um aumento abrupto de temperatura das temperaturas de caminho foi detectada durante um desses períodos e pode ser visto na Figura 4 da seção 3.1. Na Figura 8, as representações 2D de temperatura do mesmo evento de formação de canal são apresentados. A seqüência começa com um perfil de temperatura muito plano, demonstrando operação normal (Figura 8a). Tal perfil é típico da operação normal desse alto-forno específico (Figura 8b e 8c). A partir de determinado momento, as temperaturas começam a subir rapidamente na região periférica e ao longo da circunferência do forno. Isso é um exemplo clássico de formação de canal periférico. Na Figura 8(b), é demonstrado que na parte esquerda inferior a temperatura sobe mais rapidamente do que nas demais regiões. Essa é a região do caminho número 16, mencionado na seção 3.1. A região na qual o canal periférico ocorreu pode ser detectada analisando os dados 2D ou pela análise dos caminhos de temperatura individuais. Por um breve período de tempo, o perfil completo de temperatura é muito elevado (Figuras 8d e 8e).

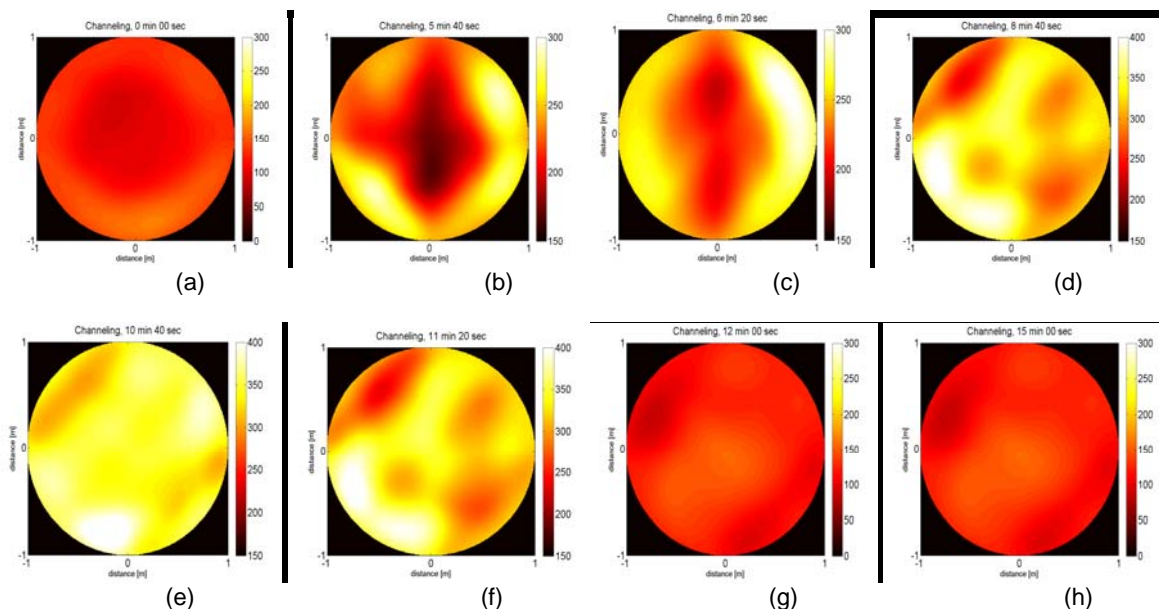


Figura 8. Esta seqüência de perfis 2D de temperatura, registrada com o sistema SOMA, mostra a aparição rápida de um canal periférico durante a operação do alto-forno. Após vários minutos, as temperaturas caem novamente e o alto-forno retorna à operação normal. O local e o tipo de canal puderam ser detectados.

3.5 Benefícios

O sistema SOMA da TMT tem, portanto, várias vantagens quando comparado a sondas de temperatura convencionais:

- primeiramente, a medição é realizada sem nenhum distúrbio do carregamento do forno;
- o sistema é de fácil instalação e virtualmente isento de manutenção;
- experiências operacionais em altos-fornos e em fornos a carvão e incineradores de resíduos demonstram que a medição acústica de temperatura de gás é robusta, precisa e confiável;
- o sistema mede a temperatura verdadeira do gás e não é sujeito a desvios no tempo;
- o algoritmo integrado de tomografia abre uma vasta gama de novos métodos de avaliação de temperatura de gás, úteis para a operação do alto-forno e que eram impossíveis, até hoje, com as sondas de temperatura convencionais;
- a cobertura ao longo da parede do alto-forno é muito melhor e, portanto, um controle e uma análise mais precisos das temperaturas periféricas do alto-forno são possíveis;
- a densidade de medida sobre a seção completa do alto-forno é mais homogênea do que para sondas de temperatura convencionais, o que torna as temperaturas medidas mais representativas e confiáveis;
- os resultados apresentados neste trabalho mostram que o sistema SOMA da TMT é capaz de rastrear a posição do canal de gás com precisão sem nenhuma limitação ou possibilidade de interpretações incorretas;
- também é possível detectar canais secundários de gás ou periféricos e até mesmo detectar a posição onde esses apareceram;
- enfim, um sistema como o SOMA da TMT, apresentado aqui, é perfeitamente adequado à combinação com sistemas supervisórios inteligentes de alto-forno.

4 CONCLUSÃO

A medição acústica de temperatura, utilizada pelo sistema SOMA, é superior em desempenho, precisão, confiabilidade e feedback de processo quando comparada a sondas de temperatura convencionais. Princípios físicos indicam que os sistemas atuais de câmeras infravermelhas não são adaptados à medição de temperatura de gás de topo. A TMT possui a propriedade intelectual e o know-how completos das tecnologias de medição e tomografia acústica de temperatura, continuamente melhoradas na indústria de ferro e aço. Em todos os clientes onde o sistema de medição acústica de temperatura (SOMA) foi instalado durante os últimos anos, ele provou suas vantagens sobre as sondas convencionais de temperatura, pela sua confiabilidade e pelas novas possibilidades de feedback de processo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer W. Hartig, H. Rausch, R.Lin e H. Summa, por seu apoio durante a instalação e desenvolvimento do sistema, por fornecer os dados da instalação no alto-forno utilizada neste trabalho, assim como por compartilharem conosco a sua experiência como operadores de alto-forno.

REFERÊNCIAS

- 1 DEUSTER, M.; DRESCHER, H. -P. Optimisation of coal fired boilers using acoustic pyrometry. In: *Coal-Gen Europe, Conference and exhibition 1-3 July 2008*, 2008, Warsaw, Poland.
- 2 DRESCHER, H. -P.; DEUSTER, M. Fire and combustion Control Using Acoustic Gas Temperature Measurement. *Energy from Biomass and waste*, 26 - 27 Jan. 2010, London, England, Jan. 2010.
- 3 DOMELS, H. -P.; DEUSTER, M. REINITZHUBER, F. Technik Trends - Metallurgie - Akustische Gastemperaturmessung an der Hochofengicht. *Stahl und eisen*, v. 129 , n. 2, p. 25-35, Feb. 2009.
- 4 TONTELING, M.; BRODECK, M.; RAUSCH, H. 2D Blast Furnace Top Gas Temperature Measurement System – SOMA, *AISTech, The Iron and Steel Technology Conference*, 6-9 Mai. 2013, Pittsburgh, USA, 2013.
- 5 MICHALSKI, L.; ECKERSDORF, J.; KUCHARSKI, J.; MCGHEE, J. Temperature Measurements of Fluids. *Temperature Measurement*, 2^aed. John Wiley & Sons, 2001, p. 371.