

SISTEMA DE DETECÇÃO DE PROJEÇÕES EM CONVERTEDORES LD UTILIZANDO PROCESSAMENTO DIGITAL DE SOM

PABLO F. SALAROLLI¹, LEONARDO G. BATISTA¹, RICARDO P. DE MENEZES¹, HENRIQUE S. FURTADO²,
ROGÉRIO P. DO AMARAL¹, MARCO ANTONIO DE S. L. CUADROS¹.

1. Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Serra

Rodovia ES 010, Km 6,5, 29173-087, Manguinhos, Serra, ES, Brasil

E-mails: pablo_salarolli@hotmail.com, leonardo-baptista@live.com,
ricpmenezes@gmail.com, rogeriop@ifes.edu.br, marcoantonio@ifes.edu.br

2. ArcelorMittal Tubarão

Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 526, 29164-280, Polo Industrial de Tubarão, Serra, ES, Brasil

E-mail: henrique.furtado@arcelormittal.com.br

Abstract— The steel production is divided in some steps. One of these steps is the transformation of pig iron into steel and the most widely used method in the world for this is through blowing of oxygen using the so-called LD converters. The reactions that provide such a transformation produce a foam inside the converter. Although it is fundamental to the process, the foam can overflow the top of the converter, an event called slopping, causing serious problems such as loss of efficiency of the process, damage to the equipment, risk to employees and environmental pollution. The detection and control of such event is crucial. The current work presents a method of slopping detection using the sound of the process. Sound and video data from 67 heats were collected at a steel mill and the results of the detection system were obtained based on the information contained in the videos.

Keywords— Slopping, LD converter, steel mill, digital signal processing, sound analysis.

Resumo— A produção do aço é dividida em uma série de etapas. Uma dessas etapas é a transformação do ferro gusa em aço e o método mais utilizado no mundo para isto é através sopro de oxigênio, utilizando os chamados convertedores LD. As reações que proporcionam tal transformação produzem uma emulsão no interior do convertedor que, apesar de ser fundamental para o processo, pode transbordar pela parte superior do convertedor, evento chamado de projeção, causando sérios problemas como perdas de eficiência do processo, danos aos equipamentos, risco para os operadores e poluição ambiental, sendo crucial a detecção e controle de tal evento. O presente trabalho apresenta um método de detecção de projeção utilizando o som do processo. Dados de som e vídeo de 67 corridas foram coletados em uma siderúrgica e os resultados do sistema de detecção foram obtidos tomando como base as informações contidas nos vídeos.

Palavras-chave— Projeção, convertedor LD, aciaria, processamento digital de sinais, análise de som.

1 Introdução

A produção do aço pelo sopro de oxigênio, conhecido como BOS (*Basic Oxygen Steelmaking*) é um importante processo metalúrgico e, devido sua eficiência, alta produtividade e baixo custo, é o método mais utilizado na siderurgia moderna (Han and Zhao, 2011; Jalkanen and Holappa, 2014). Tal processo utiliza convertedores do tipo LD (*Linz-Donawitz*) onde o oxigênio é soprado para dentro do convertedor sobre uma mistura de gusa líquido, sucata e fundentes, com o propósito de remover impurezas. Os produtos gerados são: aço (primário), escória e gases (Evestedt and Medvedev, 2006), estes últimos carregando as impurezas mencionadas.

As reações químicas de oxidação produzem uma emulsão composta de escória, gases e metal líquido, que é um componente necessário para um refino eficaz do aço, mas que pode atingir altura suficiente para transbordar pelo topo do convertedor, evento este chamado de projeção, ou mais conhecido na literatura como *slopping* (Evestedt and Medvedev, 2009). Dependendo da intensidade, as projeções podem causar sérios problemas operacionais para a

planta, ocasionando paradas não programadas para limpeza do convertedor e de áreas adjacentes, além dos danos ao meio ambiente devido às emissões geradas e perdas de rendimento metálico, que afetam os cálculos de balanço de massa e calor do sistema de controle (Widlund, Medvedev and Gyllenram, 1998). Para evitar os problemas citados, há métodos para detecção de projeção descritos na literatura. Um dos métodos é utilizar uma estimativa do nível da emulsão contida no convertedor através de sinais de som de um microfone ou sinais da vibração do convertedor ou da vibração da lança, por exemplo, utilizados nos trabalhos de (Lim, Kim and Son, 2001; Evestedt and Medvedev, 2006; Brämning, Millman, *et al.*, 2011; Brämning, Parker, *et al.*, 2011). Alguns dos outros métodos são: utilizando uma câmera observando a boca do convertedor (Kattenbelt *et al.*, 2008), sistemas baseados em um modelo matemático (Evestedt and Medvedev, 2006, 2009), etc.

O presente trabalho apresenta um sistema de detecção de projeção utilizando apenas o sinal de som captado por um microfone instalado acima do convertedor. Tal sistema possibilita ao operador tomar decisões a fim de controlar a projeção. Com o registro automático de projeções, também se torna possí-

vel uma avaliação posterior dos dados, permitindo estudos para identificação das causas de projeções. O trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentada uma descrição do processo de fabricação do aço nos convertedores LD e do processo de formação da camada de emulsão e suas consequências para o processo. Na seção 3 o sistema de medição do som para detecção de projeções é descrito. Na seção 4 são apresentados os resultados. Na seção 5 conclui-se sobre os resultados.

2 O processo LD

A Figura 1 apresenta um fluxo de produção típico de uma siderúrgica integrada. Neste, a aciaria possui o papel básico de refinar o ferro gusa produzido nos altos-fornos e sucata reciclada.

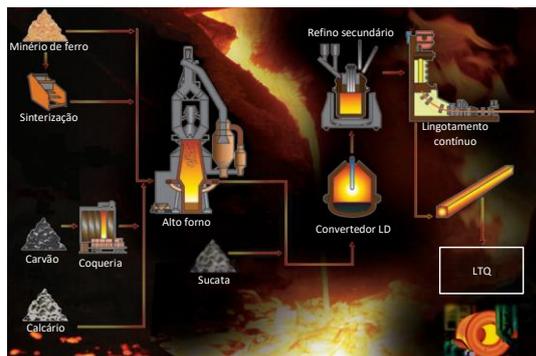


Figura 1 - Fluxo simplificado do processo de fabricação do aço. Adaptado de (Electrosteel Steels Ltd., no date).

Dentre as etapas realizadas na aciaria, o processo LD é responsável pelo refino primário. A sigla “LD” vem das cidades austríacas *Linz* e *Donawitz* (distrito de *Leoben*), onde o processo foi desenvolvido. Esse processo de fabricação de aço ocorre dentro do convertedor LD, que consiste em um vaso suspenso, dotado de um acionamento mecânico capaz de bascular sua estrutura. Seu interior é revestido por material refratário e sua carcaça é refrigerada por uma camisa com água circulante. A lança de oxigênio utilizada para canalizar o sopro de oxigênio dentro do vaso também é refrigerada à água (Fruehan, 1998). As estruturas básicas do convertedor podem ser vistas na Figura 2.

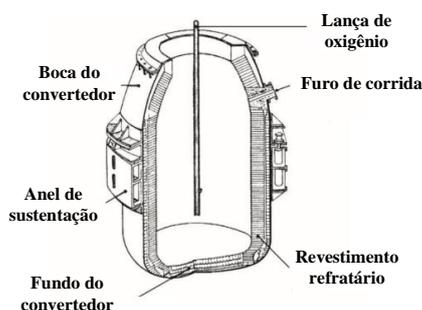


Figura 2 - Estrutura básica de um convertedor LD. Adaptado de (Lüngen, Fandrich and Schlothmann, no date)

Um ciclo operacional no convertedor LD, também chamado de corrida, envolve basicamente o carregamento das matérias primas, seguido pelo sopro de oxigênio (Rizzo, 2006). Ao fim do sopro, uma amostra é retirada para verificação da qualidade do aço desejado. O tempo de sopro pode variar de 14 a 23 minutos, devido diversos motivos, como por exemplo, composição das matérias primas e ou até mesmo devido ajustes dos operadores na composição química e temperatura finais do produto (Fruehan, 1998). No convertedor, o gusa líquido é derramado dentro do vaso, juntamente à sucata e fundentes e é soprado oxigênio puro a velocidades supersônicas, com o intuito de remover carbono, fósforo, silício e outras impurezas do banho metálico, produzindo o aço, uma mistura de óxidos líquidos (escória) e uma emulsão (Shi, 2004), conforme representado na Figura 3.

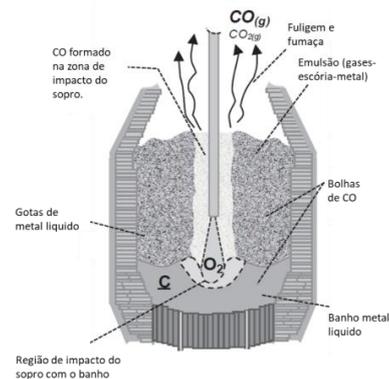


Figura 3 – Formação da emulsão dentro do convertedor. Adaptado de (Brämning, 2015).

Esta emulsão consiste de escoria, metal líquido e gases. A grande área de contato entre os componentes da emulsão promove boas condições para os processos químicos fundamentais para a produção do aço (Evestedt and Medvedev, 2006). No entanto, certas condições de processo provocam um crescimento excessivo da emulsão, fazendo com que parte do material do convertedor transborde, evento este chamado de projeção (Evestedt and Medvedev, 2009). Na Figura 4 podem ser vistas fotos da boca do convertedor durante duas projeções de diferentes intensidades.

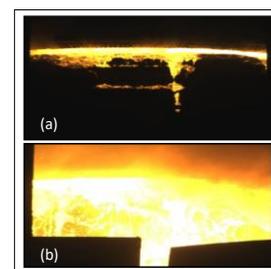


Figura 4 - Exemplos de projeções a) leve e b) severa.

Os danos causados por uma projeção mais intensa podem ser listados da seguinte forma: (Widlund, Medvedev and Gyllenram, 1998; Brämning, 2015)

- Emissão de particulado na atmosfera, causando grande impacto ambiental e severas multas à empresa, com a possibilidade da paralização de suas atividades;
- Perda de carga líquida de aço, gerando perdas de produção;
- Paradas não programadas para a retirada do material projetado, causando perda de tempo de produção;
- Possíveis danos à estrutura do convertidor e estruturas adjacentes;
- Proporcionar um ambiente de trabalho perigoso para os colaboradores da empresa.

3 O sistema de som

Durante o processo de produção do aço, o oxigênio soprado sobre o material contido no convertidor a altas vazão e velocidade gera um grande ruído ao sair da lança de oxigênio. A ideia por trás da detecção de projeção utilizando som está ligada com o nível de emulsão no convertidor, pois com o aumento do nível de emulsão, há redução da energia de certas faixas de frequências do som que sai pela boca do convertidor (Evestedt and Medvedev, 2009), fato que está representado na Figura 5.

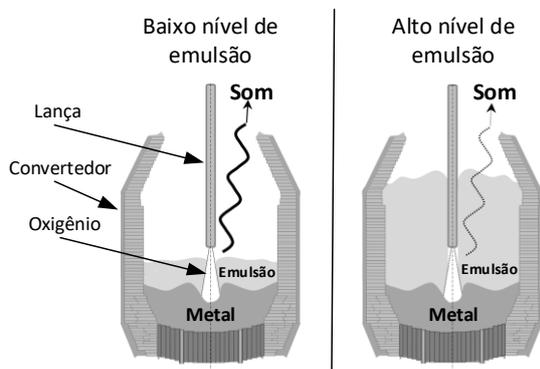


Figura 5 – Influência da camada de emulsão no nível do som. Adaptado de: (Brämning, 2015).

Dessa forma, ao instalar um microfone acima do convertidor e utilizar técnicas de processamento de sinais, pode-se encontrar quais frequências são atenuadas pela camada de emulsão e obter uma relação com a altura da emulsão dentro do convertidor, utilizada em seguida para detectar a ocorrência de projeções.

O sistema foi desenvolvido para coletar e armazenar dados de som e vídeo durante o sopro de oxigênio, e realizar o processamento e detecção de forma *offline*.

3.1 Hardware do sistema

O sistema de detecção utiliza uma infraestrutura de hardware como a mostrada na Figura 6. A seguir, os elementos que compõem esta estrutura serão detalhados.

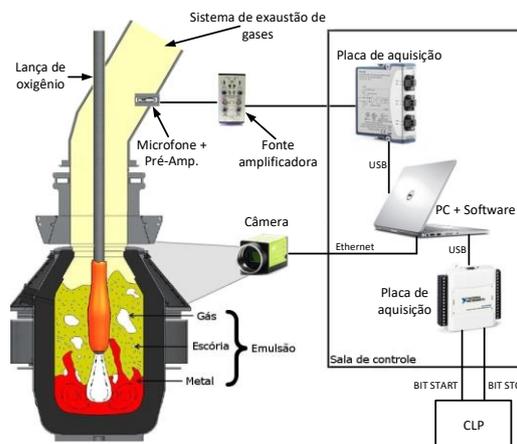


Figura 6 – Estrutura do sistema. Adaptado de: (Ghosh, 2017).

• Medição e transmissão no sinal

A captação do som é realizada por um conjunto microfone pré-amplificador, instalado na tubulação de exaustão dos gases do convertidor, protegido por um compartimento refrigerado a água e nitrogênio. O suporte do microfone possui abafadores mecânicos para evitar ruídos provenientes das estruturas adjacentes. O conjunto é alimentado por uma fonte amplificadora, que amplifica e transfere o sinal via cabo coaxial até a sala de controle.

• Vídeo

Além da aquisição de dados de som, a boca do convertidor foi filmada por uma câmera, que transmite as imagens através de um cabo ethernet para um notebook. O objetivo é registrar o momento exato da ocorrência de projeções, permitindo analisar o comportamento do sinal de som naquele instante, visando encontrar as frequências de interesse, e servindo como um registro da ocorrência de projeções durante o período de aquisição de dados, utilizado para análise dos resultados.

• Sincronização com o processo

Foram utilizadas informações do controle de processo do convertidor para identificar o início e fim do sopro de oxigênio. Foram disponibilizados dois sinais digitais de tensão (chamados de *bits START* e *STOP*) gerados por um CLP conectado ao sistema de controle de processos da siderúrgica. A aquisição de tais sinais foi realizada utilizando a placa de aquisição, que transmite tais dados via USB para um notebook. O objetivo é permitir que o sistema apenas leia e salve os dados durante o sopro de oxigênio, evitando o armazenamento de dados não relevantes.

• Aquisição do som e armazenamento

O cabo coaxial vindo da fonte amplificadora do microfone é conectado à uma placa de aquisição. A placa de aquisição envia o sinal digitalizado a um

notebook via USB. No mesmo notebook estão conectados o cabo USB da placa de aquisição dos sinais de sincronização e o cabo ethernet da câmera.

Um software foi desenvolvido em *LabVIEW* para ler e armazenar os dados de vídeo e som. O programa detecta quando o sopro é iniciado pelo *BIT START*, e inicia a aquisição de som e vídeo e salva ambos os dados em arquivos no notebook, juntamente com hora e data do início da aquisição. Quando o sopro é encerrado, o *BIT STOP* indica que a aquisição e o armazenamento devem ser interrompidos. No fim de cada corrida, obtêm-se uma planilha com os dados do som e um arquivo de vídeo com os dados da câmera.

3.2 Determinação da faixa de frequências de interesse

Após a etapa de aquisição, os dados são processados de forma *offline*, fora da planta industrial. Para realizar o processamento e obter os resultados da detecção, é necessário antes determinar a faixa de frequências de interesse. Para tanto, foram selecionadas três corridas com projeções em diferentes instantes do sopro e uma que não houve projeção alguma. Cada uma dessas corridas foi analisada seguindo o procedimento descrito a seguir.

Seguindo o diagrama da Figura 7, inicialmente tomou-se um gráfico do sinal de som de uma corrida completa no plano tempo x amplitude do som (gráfico “b”) e aplicou-se a *Short Time Fourier Transform* (STFT), uma técnica de análise tempo-frequência a fim de se obter um espectrograma, que é um gráfico de intensidade equivalente à densidade de energia espectral num plano tempo x frequência (gráfico “a”). Nota-se que conforme está indicado na Figura 7, os gráficos “a) e “b) são diferentes representações do mesmo sinal.

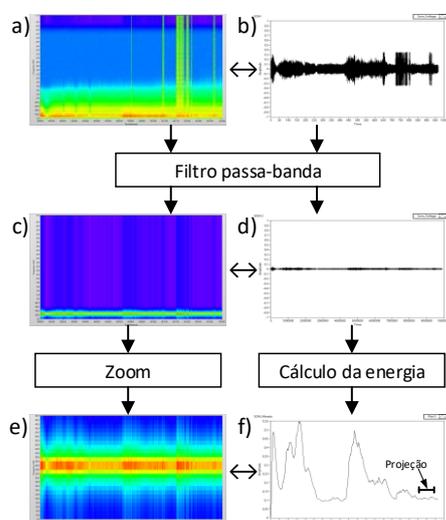


Figura 7 - Processo de determinação das frequências de interesse.

Com o espectrograma gerado, busca-se no vídeo da corrida em questão o instante em que ocorreu uma projeção e em seguida começa a análise visual no

espectrograma nos instantes de tempo próximos ao momento que ocorreu a projeção.

Esse procedimento inicial foi realizado para as 4 corridas selecionadas. Inicia-se então uma busca mais minuciosa, que consistiu em analisar o espectrograma de faixas de frequências menores, através do uso de filtro passa-banda com diferentes larguras de banda, e diferentes frequências de corte. A Figura 7 representa o efeito dessa etapa na transição dos gráficos “a) e “b) para os gráficos “c) e “d)”, respectivamente.

Em um software desenvolvido no presente trabalho, foi possível associar o resultado do processamento do som (gráfico “f) da Figura 7) com o vídeo da corrida. Com isso, a análise do som foi realizada de forma sincronizada à execução do vídeo, sendo possível avaliar o comportamento do sinal de som quando uma projeção ocorria. A interface deste programa pode ser vista na Figura 8.



Figura 8 - Software de análise de vídeo e som sincronizados.

3.3 Processamento

Determinada a faixa de frequências para a ocorrência de projeções, iniciam-se os testes de validação nos dados das corridas coletadas. A Figura 9 representa o diagrama de funcionamento do processamento digital do sinal de som para realizar a detecção da projeção.

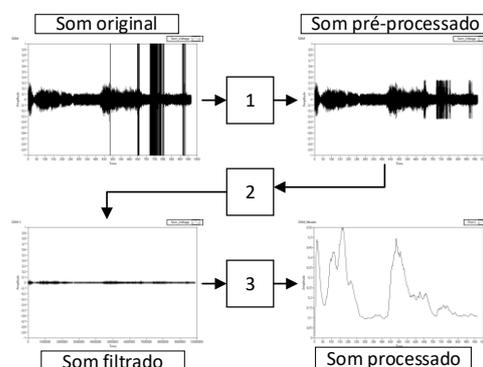


Figura 9 - Diagrama de funcionamento do software de detecção.

Como indicado na Figura 9, o funcionamento é baseado em 3 etapas:

- 1 – Pré-processamento:

O som original, exatamente como foi medido e armazenado passa por uma etapa de remoção de componentes não relevantes para a detecção. Estes valores

possuem amplitude muito elevada se comparada ao restante do sinal. Para isso, valores que extrapolam certo valor foram saturados, mantendo os valores em uma amplitude de interesse, como pode ser visto no som pré-processado da Figura 9.

- 2 – Filtro passa-banda

Após o pré-processamento, é aplicado no sinal um filtro passa-banda *Butterworth* de 10ª ordem, selecionando a faixa de frequências de interesse.

- 3 – Processamento do sinal

Por fim é realizado um processamento e após a execução desses três passos é obtido um gráfico do som processado, como o indicado na Figura 9.

O processo de detecção foi realizado utilizando este sinal de som processado e um limiar. A cada vez que o nível do som fica abaixo do limiar, é registrado como uma detecção, como está exemplificado na Figura 10.

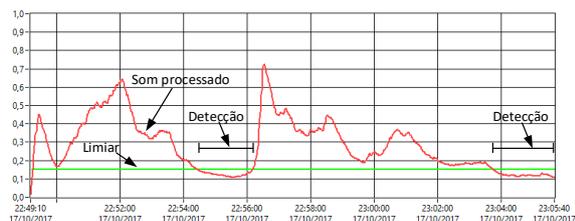


Figura 10 - Exemplo de uma corrida com duas detecções.

4 Resultados

Os resultados foram obtidos com base em dados coletados entre os dias 17 e 20 de outubro de 2017, totalizando 67 corridas. Dados do som e vídeos de uma câmera voltada para a boca do conversador foram adquiridos de forma sincronizada, a fim de que o vídeo indique o instante que ocorreram as projeções. No total, ocorreram 27 projeções.

Os resultados são apresentados em valores percentuais, baseados em três diferentes avaliações, de forma a contemplar os pontos fortes e fracos do sistema desenvolvido. Foram utilizados dois limiares diferentes obtidos de forma empírica: 0,13 e 0,15. Os resultados foram divididos em acertos, projeções perdidas e falsas detecções, conforme a Tabela 1.

A Figura 11 apresenta os resultados para ambos os limiares utilizados, e estes serão detalhados nas subseções seguintes. Um vídeo apresentando o processamento do resultado de uma corrida completa foi feito e está disponível em (GAI, 2018).

Tabela 1 - Definição de erros e acertos.

	Está projetando	Não está projetando
O som está abaixo do limiar	ACERTO	FALSA DETECÇÃO
O som está acima do limiar	PROJEÇÃO PERDIDA	ACERTO

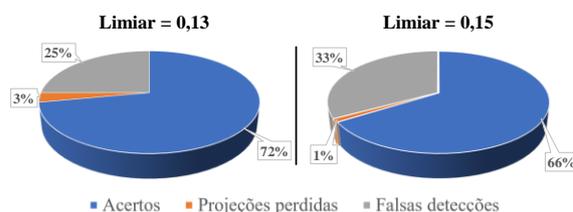


Figura 11 - Distribuições percentuais de acertos e erros.

4.1 Acertos por corrida

Nesta avaliação, uma corrida é considerada como “êxito” caso o sistema cometa apenas acertos ao longo da corrida, ou “falha”, caso o sistema cometa ao menos um erro no decorrer da corrida.

Os resultados são exibidos na Tabela 2, em valores percentuais, relacionando os acertos e o total de corridas, para os dois limiares utilizados.

Tabela 2 - Resultado 1.

Limiar	Percentual de acerto
0,13	72%
0,15	66%

4.2 Projeções perdidas por corrida

Nesta avaliação, o resultado é dado como a relação entre o número de corridas com projeções perdidas e o total de corridas.

Tabela 3 - Resultado 2.

Limiar	Percentual de projeções perdidas
0,13	3%
0,15	1%

4.3 Falsas detecções por corrida

Nesta avaliação, o resultado é dado como a relação entre o número de falsas detecções e o total de corridas.

Tabela 4 - Resultado 3.

Limiar	Percentual de falsas detecções
0,13	25%
0,15	33%

5 Conclusão

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a detecção de projeções num conversador LD usando processamento de som. Equipamentos foram instalados para aquisição de som, e foi desenvolvido um software de aquisição para captura de mais de 60 corridas. Vídeos das corridas foram gravados e analisados para verificar a eficiência do método. Os resultados mostram acertos de mais de 66% o que pode contribuir significativamente no processo.

Com base nos resultados, pode-se observar que o percentual das falsas projeções é grande e as proje-

ções perdidas são menores ao 3%, o permite concluir que o método detectará quase todas as projeções. Entretanto há a necessidade de serem descartar as falsas projeções, para melhorar sua eficiência.

Com relação aos acertos por corrida, pode-se observar que, com um nível do som mais baixo a probabilidade de ocorrer projeções é aparentemente maior.

As falsas detecções, onde o som estava atenuado, mas não foi observado projeção, podem ser indicações de que a emulsão alcançou a altura máxima e se estabilizou ainda dentro do convertedor, possivelmente pela ação previa do operador.

Por outro lado, as projeções perdidas poderiam estar associadas a possíveis adições de materiais no convertedor próximas ao evento de projeção. Estas romperiam parcialmente a emulsão, liberando a passagem do som. De fato, uma das ações atualmente em prática para conter a projeção.

Por se tratar de um primeiro contato com o problema, soluções futuras, poderão trazer grandes benefícios ao sistema atual. Dentre os trabalhos futuros estão a utilização de modelos metalúrgicos para estimar a formação da emulsão, bem como o uso de multi sensoramento, integrando medições de vibração e vídeo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ArcelorMittal Tubarão pelo fomento a esta pesquisa bem como pelos dados cedidos que possibilitaram a elaboração deste trabalho. Prestam-se agradecimentos também ao Ifes – Campus Serra e aos membros do grupo de pesquisa GAIIn.

Referências Bibliográficas

- Brämning, M., Millman, S., *et al.* (2011) ‘BOS Vessel Vibration Measurement for Foam Level Detection’, *ISIJ International*, 51(1), pp. 71–79.
- Brämning, M., Parker, G., *et al.* (2011) ‘Comparison between vessel vibration and audiometry for slopping control in the top-blown BOS process’, *Steel Research International*, 82(6), pp. 683–692.
- Brämning, M. (2015) *An Operational View on Foaming Slopping Control in Top-blown BOS Vessels*. Luleå University of Technology.
- Electrosteel Steels Ltd. (no date) *Steel Making Process*. Available at: <http://www.electrosteelsteels.com/facilities/steel-making-process.aspx> (Accessed: 26 February 2018).
- Evestedt, M. and Medvedev, A. (2006) ‘Model-based slopping monitoring by change detection’, in *2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Munich: IEEE, pp. 2492–2497.
- Evestedt, M. and Medvedev, A. (2009) ‘Model-based slopping warning in the LD steel converter process’, *Journal of Process Control*. Elsevier, 19(6), pp. 1000–1010.
- Fruehan, R. J. (ed.) (1998) *The Making, Shaping and Treating of Steel*. 11th edn. Pittsburgh, PA: AISE Steel Foundation.
- GAIIn (2018) *Detecção de Projeção em Convertedores LD Utilizando Processamento Digital de Som - YouTube*. Available at: <https://youtu.be/vTZ12kNQQ74> (Accessed: 10 April 2018).
- Ghosh, B. (2017) *Opto-Acoustic Slopping Prediction System in Basic Oxygen Furnace Converters*.
- Han, M. and Zhao, Y. (2011) ‘Dynamic control model of BOF steelmaking process based on ANFIS and robust relevance vector machine’, *Expert Systems with Applications*, 38(12), pp. 14786–14798.
- Jalkanen, H. and Holappa, L. (2014) ‘Converter Steelmaking’, in *Treatise on Process Metallurgy*. Elsevier, pp. 223–270.
- Kattenbelt, C. *et al.* (2008) ‘Detection of Slopping in Basic Oxygen Steelmaking using a Camera Viewing the Converter Mouth’, *Steel Research International*, 79(11), pp. 821–825.
- Lim, E., Kim, H. and Son, B. (2001) ‘Slopping Prediction Using Analysis of Lance Behavior in BOF’, *IFAC Proceedings Volumes*. Elsevier, 34(18), pp. 29–33.
- Lüngen, H.-B., Fandrich, R. and Schlothmann, B.-J. (no date) *Hot metal and crude steel production / stahl-online.de*. Available at: <http://en.stahl-online.de/index.php/topics/technology/steelmaking/> (Accessed: 27 February 2018).
- Rizzo, E. M. da S. (2006) *Introdução aos processos de refino primário dos aços nos convertedores a oxigênio*. São Paulo.
- Shi, C. (2004) ‘Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties’, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), pp. 230–236.
- Widlund, D., Medvedev, A. and Gyllenram, R. (1998) ‘Towards Model-Based Closed-Loop Control of the Basic Oxygen Steelmaking Process’, *IFAC Proceedings Volumes*. Elsevier, 31(23), pp. 69–74.