

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES PID E MPC APLICADOS A MOINHOS DE BOLAS PARA BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO*

Felipe Fuscaldi de Castro¹
Marcio Feliciano Braga²

Resumo

O processo de moagem no beneficiamento de minério de ferro tem grande relevância na economia de energia empregado no processo e na qualidade do produto final. Neste artigo são apresentadas as técnicas de controle mais comuns utilizadas no processo de moagem de minério de ferro. É realizada uma comparação entre os controladores PID e MPC, baseada nas produções acadêmicas mais recentes, assim como as vantagens e desvantagens da utilização de cada técnica. São apontadas as variáveis controladas e manipuladas mais comumente escolhidas por especialistas da indústria. Ao final, discorre-se sobre a combinação das técnicas supracitadas com outras metodologias e quando esses acréscimos alcançam desempenho melhor e mais satisfatório se comparado com as técnicas PID e MPC puramente.

Palavras-chave: PID; MPC; moagem; controle de processos; estudo comparativo.

COMPARATIVE RESEARCH BETWEEN PID AND MPC CONTROLLERS APPLIED TO BALL MILLS IN IRON ORE PROCESSING

Abstract

The grinding mill process in iron ore processing has great relevance in the energy savings used in the process and in the quality of the final product. In this paper the most common control techniques used in the iron ore grinding mill process are presented. A comparison between the PID and MPC controllers, based on the most recent academic productions is made, as well as the advantages and disadvantages of the use of each technique. Controlled and manipulated variables commonly chosen by industry experts are pointed out. Finally, the paper discourses the combination of the aforementioned techniques with other methodologies and when these additions achieve better and more satisfactory performance when compared with purely PID and MPC techniques.

Keywords: PID; MPC; grinding mill; control process; comparative research.

¹ Engenheiro Eletricista, Mestrando em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Instituto Tecnológico Vale/ Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Doutor em Engenharia Elétrica (Automação), Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica (DEELT) e Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM-ITV), Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A indústria extrativa tem importância significativa na economia brasileira representado 4,3% de todo o PIB do Brasil e 16,9% do PIB Industrial brasileiro, de acordo com dados do IBGE 2013 [1]. Parte desta fatia está relacionada ao minério de ferro que é uma das principais *commodities* que o Brasil exporta. Esses números podem tornar-se melhores com o investimento em tecnologia para a otimização dos processos aplicados a este setor.

No processo de beneficiamento do minério de ferro, a moagem é uma das etapas mais críticas da produção e de maior consumo energético. Tais fatos abrem caminhos para pesquisas em otimização, eficiência e controle do processo, com o objetivo de alcançar maior economia e qualidade do produto a ser gerado nesta etapa.

Dentro desta proposta, este artigo apresenta quais têm sido as técnicas de controle do processo de moagem adotadas nas indústrias de mineração no Brasil e no mundo e quais pesquisas tem norteado o tema. Pretende-se apresentar uma revisão dos principais casos do uso de técnicas de controle MPC (do inglês, *Model Predictive Control*) e PID (Proporcional, Integral e Derivativo) na indústria e que estão relatados em artigos e revistas técnicas.

Este trabalho trata-se de uma revisão, que foi realizada por meio de levantamento bibliográfico e experiências de grupos de estudo sobre o assunto Controle de Processos no beneficiamento de minério de ferro.

Este documento foi estruturado em 4 etapas, sendo elas as seguintes: elaboração da pergunta norteadora, busca por artigos relacionados à pergunta, análise qualitativa dos artigos e conclusões. A pergunta norteadora definida foi: Quais as contribuições das metodologias de controle PID e MPC para o equipamento moinho de bolas no beneficiamento de minério de ferro?

Com base na pergunta norteadora foram realizadas buscas na literatura utilizando as palavras-chave MPC, PID, *grinding mill*, *mining process*, *iron ore* e *control*, nas principais bases acadêmicas (IEEE Xplorer, Science Direct, Google Scholar, Elsevier, ABM, Scopus, CBA, Scielo e Springer) que resultaram em uma grande quantidade de artigos. Do total de trabalhos encontrados foram selecionados 23 que compõem este estudo.

Este trabalho está dividido de seguinte maneira. A Seção 2 descreve o controle de processo na moagem. A Seção 3 aponta as variáveis que são mais comumente utilizadas no controle diferenciando as variáveis controladas e manipuladas e ainda apresentando outros métodos não convencionais de identificação de variáveis. A Seção 4 desenvolve um comparativo entre as duas técnicas mais utilizadas para o controle na moagem de minério de ferro com suas vantagens e desvantagens. Por fim, é apresentada a conclusão do trabalho, na Seção 5, e as referências utilizadas.

2 CONTROLE NO PROCESSO DE MOAGEM

Ao realizar o controle no circuito de moagem, busca-se fazer com que as saídas dos processos controlados sigam as referências de controle e que elas estejam dentro de faixas de operação ótimas [2].

Os objetivos do controle para um circuito de moagem são: melhorar a qualidade do produto, maximizar o rendimento, diminuir o consumo de energia, reduzir o uso de meios de moagem e melhorar a estabilidade do processo [3].

A moagem é um processo complexo com pelo menos três aspectos significativos. O primeiro refere-se aos equipamentos do processo, como moinho de bolas, ciclone, polpa de lama, válvulas, dentre outros que são dispositivos dinâmicos e resultam em maior complexidade no controle. O segundo relaciona-se aos muitos fatores que são aleatórios e de grande incerteza, o que tornam o processo não linear [4]. O terceiro está ligado aos desafios ao controlar um processo de moagem que são o forte acoplamento entre variáveis, grandes atrasos no tempo, perturbações incontroláveis, variação de parâmetros ao longo do tempo, as não linearidades no processo e inadequações de instrumentação [3].

Segundo [5], grande parte dos circuitos de moagem no Brasil são controlados por controladores de entrada única e saída única (SISO, do inglês *Single Input Single Output*) PI (Proporcional Integral) descentralizados. De acordo com [6], o controle de processos industriais mais difundido e utilizado empregam controladores PID e, que por muitas vezes, ficam restritos somente ao controle PI. Apesar de existirem estratégias de controle envolvendo algoritmos mais sofisticados, o controlador PID ainda é o mais utilizado em 80% dos ambientes industriais.

Em uma pesquisa realizada por [7], as técnicas de controle mais usadas na indústria para o controle em processos de moagem são o controle PID, seguidos dos controladores MPC. Isso é evidenciado devido à considerável quantidade de publicações que abordam Controle MPC e parte dessas tem boa aceitação para a indústrias. Essa mesma pesquisa indica um crescente uso dos controladores MPC em substituição aos tradicionais PID.

3 VARIÁVEIS COMUMENTE CONTROLADAS NA MOAGEM

O processo de moagem do minério de ferro apresenta, como em tantos outros, variáveis controladas que interferem diretamente no sistema e que podem ser medidas e também variáveis manipuladas que permitem alguma alteração por parte do controlador nas variáveis controladas.

As principais variáveis controladas podem ser citadas como granulometria, a percentagem de sólidos, carga circulante e densidade da polpa, dentre outras [5]. É citado também em [8], devida a baixa eficiência do processo, o consumo específico de energia gasto pelo moinho. O consumo está diretamente relacionado a outras variáveis como o revestimento interno e a carga das bolas dentro de um moinho, porcentagem de enchimento, etc.

Em [8], indica-se que as variáveis controladas dependiam umas das outras sinalizando que o controle na moagem é multivariável, devido à interação das variáveis. Foram citadas por especialistas da indústria como variáveis controladas que tinham maior utilização na prática industrial, o tamanho da partícula do produto, o nível de polpa nas caixas e a densidade de polpa na caixa [7], apesar do controle do processo de moagem não se restringir a utilização somente dessas.

Por outro lado, as variáveis manipuladas mais comumente estudadas são a taxa de fluxo de água na caixa, a taxa de fluxo de água para o moinho, a taxa de alimentação de sólidos para o moinho e a taxa de fluxo da polpa de descarga da caixa. [7]

Em [9], o estudo de caso acrescenta outras variáveis em uma abordagem diferente na qual a comutação de uma bateria de ciclones pode ser usada como uma variável adicional manipulada para o circuito de moagem. Esse estudo mostra que a comutação de ciclones pode ser usada para ampliar a faixa de controle para o tamanho de partícula do produto.

Na publicação [10], os autores criam um modelo fenomenológico não-linear de um moinho o qual é usado para determinar cinco parâmetros do circuito de moagem para minério bruto (ROM). Os cinco parâmetros são fração de finos e fração de rochas do minério alimentado à usina, fator de abrasão de rocha e de aço e potência necessária para uma tonelada de finos produzidos.

O artigo [11] estuda os estados e parâmetros desconhecidos de um modelo não linear de um circuito de moagem, tornando-os identificáveis a partir de variáveis manipuladas, controladas e mensuráveis.

Nota-se que existe uma gama de variáveis que podem ser estudadas e controladas com a finalidade de otimizar, estabilizar ou para garantir segurança ao processo de moagem, entretanto foram apresentadas as que possuem maior relevância ou ainda maior objeto de estudo na literatura consultada.

4 COMPARATIVO DAS TÉCNICAS DE CONTROLE MAIS UTILIZADOS NA MOAGEM

As técnicas de controle mais aplicadas à indústria de modo geral são o controle PID e MPC conforme já descrito. Entretanto, existem outras técnicas como citado por [12], como Controle Multivariável, Sistemas Especialistas e Controle baseado em Lógica Fuzzy. São encontradas nas publicações, metodologias e controladores que são baseados no controlador PID, que trazem abordagens diferenciadas para esse controlador, com descrito em [5], [6], [13] e [15]. Da mesma forma, são encontrados também controladores baseados em MPC ou ainda que utilizam metodologias acrescidas ao MPC com o objetivo de melhorar de algum tempo de resposta, a inserção de restrições, etc., assim como em [5], [19], [22] e [23].

4.1 Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID)

Uma grande porcentagem das indústrias ainda usa controladores Proporcionais, Integrais e Derivativos (PID) ou apenas PI em seus circuitos de moagem. Devido à dificuldade de implementar e manter o controle de processo avançado, e também porque há falta de modelos dinâmicos e fundamentais suficientes para circuitos de processamento mineral, controladores do tipo PID ainda são bem aceitos em plantas industriais [13].

Os PID são simples, relativamente fáceis de ajustar e podem lidar com muitas condições operacionais respondendo satisfatoriamente. Tais vantagens justificam o grande uso desse tipo de controlador na indústria.

Entretanto, os controladores PID geralmente não conseguem lidar com variações de parâmetros, perturbações, ruídos, restrições nas variáveis e no controle de forma robusta, em comparação com outras técnicas. Controladores PI / PID multi-loop convencionais, geralmente tornam-se lentos, levando a desempenhos de controle insatisfatórios e o controle preciso do processo torna-se quase impossível na prática [14].

Devido a isso, as vantagens citadas para o controlador PID podem ser potencializadas e suas desvantagens podem ser minimizadas quando combinadas com outras técnicas e metodologias de controle de processos.

Estudos de caso como o realizado por [6] apresenta a utilização do PID com estratégia de controle preferencial com restrições de processo. É ressaltado que o controlador com as configurações supracitadas atende de maneira satisfatória a necessidade da usina de beneficiamento de minério em estudo.

Em outros estudos de casos, são combinados o controlador PID e lógica *Fuzzy* para controle de um moinho em uma mina de cobre [15]. Para o loop simples aplica o controle PID, mas para o loop complexo é aplicado controle em cascata adicionado a Lógica *Fuzzy*. Assim como em [16] que relaciona a mesma combinação na qual o sistema usa a associação da lógica *Fuzzy* com o controle PID.

Controladores FOPID (*Fractional Order Proportional Integral Derivative*), método não convencional de sintonia de controladores PID, foi utilizado em [13]. Algumas vantagens citadas como menores tempos de resposta e, conseqüentemente, menor atraso e maior estabilidade tornam o método mais vantajoso, se comparado aos tradicionais PID.

4.2 Controlador Preditivo por Modelo (MPC)

O controle de um processo é usado para melhorar o desempenho, estabilizar a produção, lidar com restrições, proteger equipamentos e mudanças de nível de gerenciamento [17]. Se o desempenho do processo exigir abordagens de controle mais sofisticadas, o MPC é geralmente a primeira escolha, pois é melhor usado para processos com forte acoplamento entre variáveis, metas de otimização competitivas e restrições de processo limitadas [17].

Muito difundido na indústria petroquímica dos anos 80, o MPC ainda pode ter um maior aproveitamento na indústria de processamento de minerais. Devido à sua capacidade para tratar processos multivariáveis que possuem restrições, a técnica MPC tem sido amplamente estudada e aplicada na mineração [18].

O MPC atua simultaneamente sobre as variáveis controladas e conduz o equipamento a seu ponto ótimo de funcionamento, compreendido entre os seus limites de operação e segurança, enviando *set-points* para as variáveis manipuladas em consonância com os respectivos limites máximos e mínimos especificados [18].

Destacam-se quatro vantagens para o uso da técnica MPC, sendo elas [19]: (1) capacidade de lidar com sistemas MIMO (do inglês, *Multi-Input Multi-Output*); (2) capacidade de controlar processos difíceis, tais como processos com atraso de tempo e de fase não mínima; (3) capacidade de lidar com restrições tanto em variáveis manipuladas quanto controladas; e (4) simplicidade de modelagem (geralmente dependentes de Degrau/ Resposta ao Impulso), etc.

Tanto modelos lineares quanto não lineares podem ser utilizados na técnica MPC, mas geralmente é mais fácil considerar processos não lineares como uma série de modelos lineares e alternar modelos com base nas condições do processo [17].

Melhorias adicionais ao desempenho geral do MPC podem ser alcançadas pela incorporação de ferramentas de controle de periféricos, como medições inferenciais, observadores de perturbações ou detecção de incompatibilidade de planta-modelo [3].

Apesar das grandes vantagens citadas que justificam o uso do método MPC, existem ainda algumas restrições, como a falta de medições em tempo real suficientes para estimar os estados e parâmetros do modelo. O número de medições disponíveis em tempo real é geralmente muito menor do que o tamanho do vetor de estado a ser medido. Portanto, as ferramentas periféricas do circuito de controle, *soft sensors*, tornam-se tão importantes quanto o próprio controlador [20].

O controle utilizando MPC também permite combinações que tornam o controlador mais adaptado ao processo ou ainda melhorando seu desempenho.

Outra estratégia muito comum na literatura, é acrescentar alguma técnica extra ao MPC que tem por objetivo a redução da rejeição de grandes perturbações. Em [21],

é descrito um controlador RN MPC (do inglês, *Robust Nonlinear Model Predictive Control*) que incorpora explicitamente a incerteza no projeto e o valida em um modelo de circuito de moagem não linear simplificado sem aproximação. O RN MPC projetado exibiu boa rejeição a perturbação. As desvantagens incluem o fato de que o tempo computacional é maior do que o tempo de amostragem necessário [21].

No estudo [19], também é tratada a rejeição de perturbações, contudo empregando DOB (Observadores de distúrbios) e MPC em um circuito fechado de controle. O motivo do interesse é que no processo de moagem, perturbações complexas e imensuráveis geralmente têm influências indesejáveis no sistema de circuito fechado. A combinação dos métodos obteve notável superioridade em rejeitar distúrbios em circuitos de moagem [19].

Ainda na mesma área de rejeição de perturbação, [13] propõe o projeto e a aplicação de dois tipos de controladores SISO de ordem fracionária em um circuito de moagem, os resultados indicam que os controladores obtiveram resultados semelhantes ou melhores em comparação com o LMPC (do inglês, *Linear Model Predictive Control*) na presença de perturbações paramétricas e ruído de processo [13].

O HMPC (Híbrido MPC) proposto por [22] minimiza o consumo específico de energia do moinho e estabiliza a planta, garantindo um tamanho fixo (ou pré-definido) de partícula de saída.

Para [5], a combinação de MPC com Controle por Matriz Dinâmica (DMC) é utilizada em um processo de remoagem de minério de ferro. As variáveis controladas são submetidas ao controle DMC e o controle regulatório, formado por controladores PID, é utilizado como variável manipulada pelo DMC [5].

Um controlador preditivo não linear de modelo híbrido (HN MPC) é desenvolvido para um circuito milimetrado de minério *run-of-mine*. O modelo resultante é um modelo não linear híbrido com dinâmica contínua e discreta. Uma simulação do HN MPC mostra as vantagens de usar o grupo de hidrociclones como uma variável manipulada adicional. As vantagens do HN MPC são ilustradas pela comparação do seu desempenho com um MPC não linear, em que não é possível a comutação de hidrociclones [23].

4.3 Comparativo entre controladores PID e MPC

Os controladores PID e MPC ganharam grande importância na indústria e em especial para a mineração. Percebe-se que esses controladores se situam em opostos como por exemplo, a simplicidade de implementação do PID e a robustez a ruído do MPC. Em aplicações no qual é necessária simplicidade de implementação, baixo custo de operação e manutenção, o controlador PID torna-se muito adequado. Até mesmo quando se pretende aplicar restrições ao controle do processo, garantir menores tempos de resposta, menor atraso e maior estabilidade, os controladores PID combinados com outras técnicas têm desempenho satisfatório. A boa difusão e utilização deste método na indústria faz com que existam estudos na busca de melhorias no seu desempenho.

Em sistemas no qual é necessária boa robustez a perturbações, menor variação de parâmetros ou processos multivariáveis, o MPC tem melhor aproveitamento se comparado ao PID. De maneira geral, o MPC possui mais recursos de utilização do que o PID, porém nem sempre tais recursos são necessários. É aconselhável quando se tem no processo, acoplamento entre variáveis, metas de otimização

competitivas e restrições de processo limitadas, a aplicação do MPC como melhor escolha para o controle.

Existem algumas restrições, como a falta de medições em tempo real suficientes para estimar os estados e parâmetros do modelo. E ainda o número de medições disponíveis em tempo real é geralmente muito menor do que o tamanho do vetor de estado a ser medido. Parte dessas restrições podem ser minimizadas com a combinação de técnicas ao MPC – podendo citar RN MPC, LMPC, etc.

De forma conclusiva, o MPC é o controlador mais adaptado para a utilização em processos multivariáveis e com necessidade de limitações e restrições de parâmetros.

5 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma breve revisão sobre o controle de processos na mineração, especificamente na Moagem. Foram mostradas as justificativas para o grande volume de estudos nesta área.

Constatou-se que o controle de processos na Moagem possui uma pequena quantidade de variáveis controladas e manipuladas que são utilizadas pela maioria dos profissionais especialistas, não havendo grandes variações nas escolhas. Grande parte dos estudos recentemente publicados demonstram uma interdependência dessas variáveis, fato que torna o controle desse processo mais complexo.

Existem ainda formas distintas para realizar o controle na moagem a partir de produtos dos ciclones como relatado nesse estudo.

Conclui-se que os controladores PID, bem difundidos na indústria de modo geral, têm desempenho satisfatório para as aplicações menos complexas. Combinando esse controlador com outras técnicas, é possível obter ganhos de desempenho e estabilidade. Devido à grande quantidade desses equipamentos em plantas industriais, tal combinação pode ser vantajosa.

Os controladores preditivos baseados em modelo mostram uma crescente aceitação para a indústria de beneficiamento de minérios e, apesar de algumas limitações, são mais robustos que os tradicionais PID.

Em trabalhos futuros, propõe-se implementar algumas das técnicas avaliadas em um modelo de moinho de bolas e posterior implementação em uma planta industrial. Como sugestão, recomenda-se realizar pesquisas com o intuito de combinar os controladores MPC e PID com outras técnicas já difundidas em outras indústrias e não demonstradas nesse trabalho e avaliar possíveis melhoras de desempenho.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Tecnológico Vale – ITV pelo apoio ao estudo exposto neste trabalho. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a UFOP pelo apoio e financiamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Confederação Nacional da Indústria. Instituto Brasileiro de Mineração. Mineração e economia verde. – Brasília: CNI; 2012.
- 2 Zhou P, Lu SW, Meng Y, Chai SW. Survey on higher-level advanced control for grinding circuits operation. Powder Technology. 2016. vol. 288, pp. 324-338.

- 3 le RouxJD, Padhi R, CraigIK. Optimal control of grinding mill circuit using model predictive static programming: a new nonlinear MPC paradigm. *J. ProcessControl*. 2014. Vol 24 (12), pp. 29-40
- 4 Hongwei Z, Yiming Q, Jiye Z, Yuanheng Z. Based on multi-agent model for grinding process control research. *Proc. 5th Int. Conf. Frontier of Comput. Sci. Technol. (FCST)*. 2010. pp. 576-581.
- 5 Reis, LA. Controle de um Circuito Simulado de Remoagem de Minério de Ferro por Controle Preditivo por Modelo. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto.
- 6 Baeta EJS, Silva CG, Silva MC. Estratégia de controle preferencial em plantas de beneficiamento de minério de ferro: aplicações práticas e benefícios, p. 52-61. In: *19º Seminário de Automação & TI*, Rio de Janeiro, 2015.
- 7 Wei D, CraigIK. Grinding mill circuits: a survey of control and economic concerns. *Int. J. Miner. Process*. 2009. Vol 90 (1–4). pp. 56-66.
- 8 Donda, JD, Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minério de ferro em moinhos de bolas. Belo Horizonte, Tese (doutorado), CPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003
- 9 Botha S, Craig, IK, le Roux, JD, 2015. Switching cyclones to increase product particle size range for ore milling circuits. In: *IFAC Workshop on Automation in Mining, Minerals and Metal Industry*, Oulu, Finland, 25–27 Aug., 2015. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, issue 17, pp. 92–97.
- 10 le RouxJD and CraigIK. Identifiability of run-of-mine ore grinding mill circuit parameters. *AFRICON, 2011*, Livingstone, pp. 1-6.
- 11 Le Roux JD, CraigIK. State and parameter identifiability of a nonlinear grinding mill circuit model 17th IFAC Symp. Mining Mineral Metal Processing, vol. 49, Vienna. Austria (2016), pp. 1-6
- 12 Mitra K. Multiobjective optimization of an industrial grinding operation under uncertainty *ChemEngSci*, 64 (23) (2009). pp. 5043-5056.
- 13 Camacho, NA, le Roux, JD, Mermoud, M.A.D., Orchard, M.E.: Control of a grinding mill circuit using fractional order controllers. *J. Process Control* 53, 80–94 (2017)
- 14 Zhou P, Chai T, Wang H, SuCY, "Multivariable decoupling internal model control for grinding circuit," *2008 American Control Conference*, Seattle, WA, 2008, pp. 2475-2480
- 15 Zhou X, Zuo N, Su H, "Study on intelligent control for ore grinding and grading process," *2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing*, Shanghai, 2010, pp. 364-367.
- 16 Zou JH, Chen W, Tang ZJ, Huang SW, "Fuzzy Intelligent Control for Ore-giving System of Grinding Classification," *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha City, 2010, pp. 329-332.
- 17 Ruel M. Fuzzy Logic Control On a SAG Mill. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. Vol46.Issue16.Pages 282-287.
- 18 Gedraite, R. et al. Considerações práticas sobre controle avançado de processo aplicado a moinho de bolas. *Holos*, [S.l.], v. 3, p. 122-132, jul. 2014. ISSN 1807-1600. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1764>>. Acesso em: 06abr. 2018.
- 19 Yang J, Li S, Chen X, Li Q. Disturbance rejection of ball mill grinding circuits using DOB and MPC *Powder Technol.*, 198 (2) (2014), pp. 219-228.
- 20 le Roux JD, Steinboeck A, Kugi A, Craig IK. An EKF observer to estimate semi-autogenous grinding mill hold-ups. *J. ProcessControl*. Vol 51 (2017), pp. 27-41
- 21 Craig IK, "Grinding mill modeling and control: Past, present and future," *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*, Hefei, 2012, pp. 16-21.
- 22 Estrada F. 2044. Hybrid model predictive control for grinding plants. In: *19th IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa, 24–29 Aug., 2014. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, issue 3, pp. 11512–11517.

- 23 Botha S, le Roux JD, Craig IK. Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit. MineralsEngineering. 2018. Volume 123. Pages 49-62