

OTIMIZAÇÃO EM TEMPO REAL NA MINERAÇÃO DE FERRO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E POSSÍVEIS APLICAÇÕES*

Mário Sérgio Santos¹
Thiago Antonio Melo Euzébio²

Resumo

Este trabalho tem como objetivo demonstrar os principais conceitos de otimização em tempo real (RTO) e apresentar os principais trabalhos realizados na literatura que abordam este tema dentro da mineração de minério de ferro. De forma sucinta é realizada uma contextualização da otimização em tempo real dentro do controle de processos, de forma a demonstrar todas as camadas de controle que podem existir dentro de uma planta. A otimização em tempo real permite fazer correções nas condições de operação de um processo, com o menor atraso possível, a fim de buscar um desempenho ótimo. Existem poucos trabalhos na literatura que demonstram implementações de RTO na mineração de ferro, e as implementações que foram realizadas são em circuitos isolados e não na planta toda de forma integrada, e a grande parte são trabalhos realizados em ambiente laboratorial.

Palavras-chave: Otimização em Tempo Real; Mineração; Minério de Ferro.

REAL-TIME OPTIMIZATION IN IRON MINING: A BIBLIOGRAPHIC REVIEW AND POSSIBLE APPLICATIONS

Abstract

This work aims to demonstrate the main concepts of real time optimization (RTO) and present the main works carried out in the literature that deal with this topic within iron ore mining. Briefly, a contextualization of real-time optimization within the process control is performed, in order to demonstrate all layers of control that may exist within a plant. Real-time optimization allows you to make corrections to the operating conditions of a process, with the least possible delay, in order to achieve optimum performance. There are few studies in the literature demonstrating RTO implementations in iron mining, and the implementations that have been carried out are in isolated circuits and not in the whole plant in an integrated way, and the great part are works done in a laboratory environment.

Keywords: Real-time Optimization; Mining; Iron Ore.

- ¹ Engenheiro de Controle e Automação formado pela Universidade Federal de Ouro Preto, mestrando em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração pela Universidade Federal de Ouro Preto em parceria com o Instituto Tecnológico Vale, engenheiro de automação na VALE S/A, Itabira, Minas Gerais, Brasil.
- ² Engenheiro Eletricista, Doutor em Instrumentação Eletrônica e Controle, Pesquisador, Controle e Robótica, ITV, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Muitas são as aplicações dos minérios ou minerais em nosso cotidiano, e eles aparecem em praticamente todos os momentos do dia a dia, fazendo lembrar de sua importância dentro da história da humanidade. O minério de ferro é um dos metais mais utilizados pela sociedade atual. É indispensável devido ao seu baixo preço e aplicabilidade, especialmente por ser a principal matéria-prima na produção do aço, que é a liga metálica de ferro mais conhecida, e o qual é amplamente empregado na produção de automóveis, navios, máquinas, ferramentas, construção civil, e uma infinidade de coisas que estão ao nosso redor. É uma das principais *commodities* exportadas pelo Brasil e tem grande importância na composição do PIB do país.

A primeira etapa da obtenção do ferro se dá através da extração do seu minério. Essa etapa se resume, basicamente, em utilizar equipamentos para lavar uma determinada área, onde o minério é abundante, e transportá-lo até as usinas, onde ele irá passar pelo processo de beneficiamento. Este processo fará com que o minério bruto se torne mais adequado ao processo de obtenção do ferro metálico nas siderurgias. O beneficiamento do minério de ferro é composto por uma série de processos que objetivam, a partir do material resultante da extração, separar e concentrar os minerais desejados, retirando o rejeito do minério, que é a parte para a qual não há interesse econômico. Os processos podem ser físicos ou químicos e sua utilização depende dos fins e da qualidade destinados ao minério beneficiado. Na britagem é reduzida a granulometria do minério através de britadores e peneiras. A moagem também é responsável por reduzir a granulometria do minério, através de moinhos, de modo a adequar o minério às etapas seguintes do processo. Na deslamagem são retiradas as partículas ultrafinas prejudiciais às fases posteriores do beneficiamento. Na classificação e concentração temos o peneiramento que separa minério do rejeito por granulometria; a jigagem, que separa minério e rejeito por densidade; a separação magnética que separa minério e rejeito por propriedades magnéticas; e a flotação, que separa minério e rejeito por propriedades químicas, além de ajustar o minério quimicamente. O produto final do beneficiamento é chamado concentrado e sua qualidade e preço estão diretamente associados ao teor de ferro que apresenta.

A operação de um processo simultaneamente com várias restrições, como é o caso do processo de beneficiamento de minério de ferro, aumenta substancialmente a complexidade do controle de processo. Diferentes combinações de variáveis manipuladas e de variáveis controladas são geradas, e isso faz com que seja difícil a correlação direta de variáveis manipuladas com uma única variável controlada. Sendo assim, técnicas avançadas de controle são necessárias para permitir que todas as variáveis manipuladas que influenciam uma variável dependente específica possam ser incluídas no seu controle. Os sistemas tradicionais de controle em malha fechada não são capazes de lidar com problemas de controle multivariável [1].

A Figura 1 mostra os cinco níveis na hierarquia de controle do processo, onde várias atividades de otimização, controle, monitoramento e aquisição de dados são empregadas. A posição relativa de cada bloco na Figura 1 destina-se a ser conceitual porque pode haver sobreposição nas funções realizadas, e muitas vezes vários níveis podem utilizar a mesma plataforma de computação. As escalas de tempo

relativas para a atividade de cada nível também são mostradas. Os dados do processo, bem como os dados da empresa, que consistem em informações comerciais e financeiras, são usados com as metodologias apresentadas para tomar decisões em tempo hábil. O nível mais alto (planejamento e programação) define metas de produção para atender às restrições de suprimento e logística e aborda as decisões de utilização de capacidade e mão de obra variando no tempo [2].

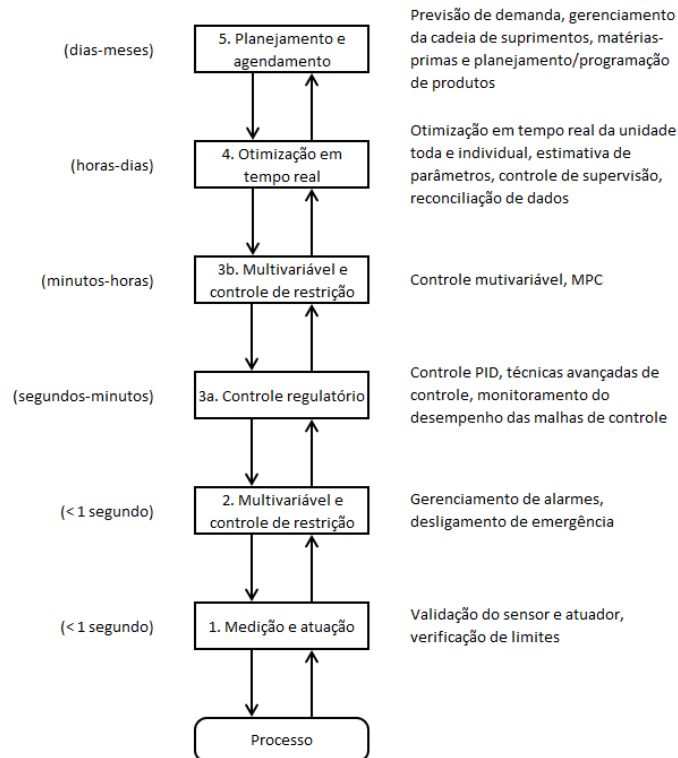


Figura 1. Os cinco níveis de controle de processo e otimização[2]

Problemas do dia-a-dia no sequenciamento das atividades podem causar impactos significativos nas operações da planta, modificando as decisões que são feitas no nível RTO e que vão requerer mudanças no nível de controle preditivo com modelo (MPC). O RTO implementa decisões empresariais em tempo real baseado em um modelo de estado estacionário não linear calibrado, com um detalhamento do modelo maior do que aquele utilizado pelo planejamento. Tipicamente são formulados com base em uma função de custo econômica. Os valores do RTO são diretamente traduzidos para valores ou parâmetros do MPC. O MPC fornece um controle dinâmico da planta e possui uma certa capacidade de otimização. Por fim, a camada mais baixa é representada pelo sistema de controle distribuído (DCS) ou controlador lógico programável (PLC), que é responsável pelo controle regulatório, onde na maioria das vezes é utilizado o controlador PID. O sucesso do RTO requer suporte de toda a organização e se não for bem planejado pode se tornar um fracasso[3].

Neste trabalho faz-se uma abordagem sobre o tema RTO, demonstrando os principais conceitos e características, bem como onde o RTO está inserido, e é realizada uma revisão na literatura através de uma consulta a artigos científicos relacionados a área de mineração, a fim de verificar as melhores práticas e o que tem sido proposto na implementação de RTO na mineração, em especial na mineração de minério de ferro. Foram encontrados vários trabalhos realizados na

indústria química, principalmente na indústria do petróleo. Poucos foram os artigos que abordam o processo de beneficiamento de minério de ferro.

2 MOTIVAÇÃO

As aplicações de otimização em tempo real são normalmente associadas a grandes sistemas como um conjunto de processos unitários interligados. Espera-se que com os controles avançados (APC) as variáveis importantes tenham baixa variabilidade, enquanto que com a otimização em tempo real o processo se desloque para um ponto mais econômico segundo um objetivo determinado, como aumento de produção ou atender as especificações de qualidade de um determinado produto ou subproduto. Atualmente existem tecnologias que oferecem RTO e APC de forma integrada. Tem-se observado o uso de Sistemas Especialista com lógica “Fuzzy” em projetos de RTO + APC particularmente no segmento de Mineração. Entretanto, a mais usual é sem dúvida a do MPC. O MPC oferece a possibilidade de otimização de forma simples, usando modelos de processo e métodos de otimização integrados ao controle [4].

Na Figura 2, adaptado de [4], podemos ver o efeito das técnicas de APC e de RTO agindo na evolução de uma variável de processo ao longo do tempo. O APC permite reduzir a variabilidade e o RTO deslocar o valor desejado desta variável para um valor melhor do ponto de vista econômico.

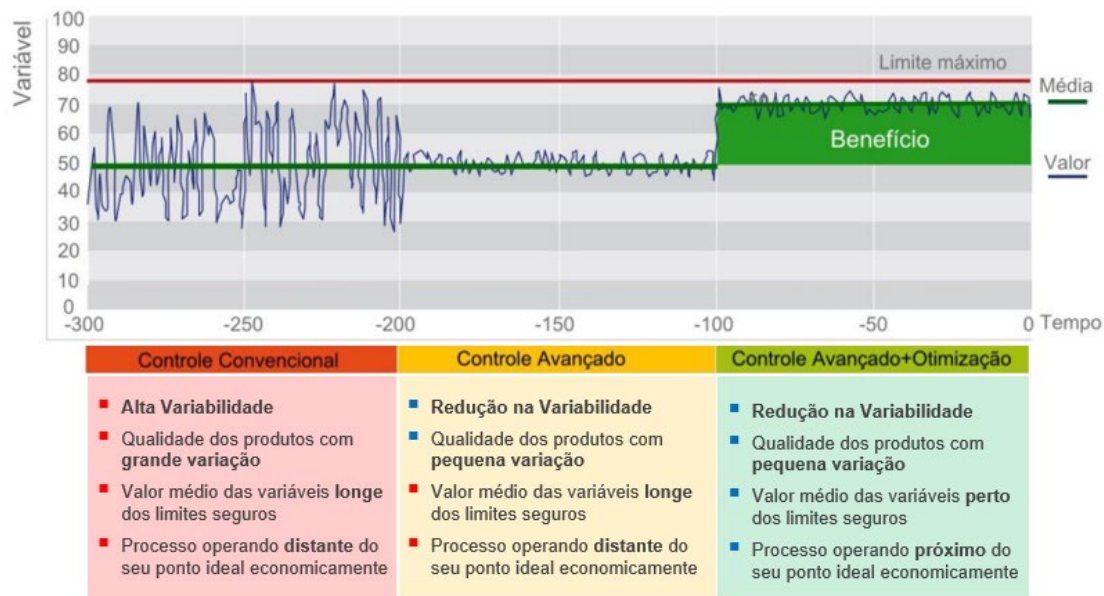


Figura 2. Evolução de uma variável crítica ao longo do tempo

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na sequência os principais pontos dos trabalhos mais relevantes que foram encontrados na literatura são apresentados.

Lestage, Pomerleau e Hodouin (2002), em [5], utilizam uma aplicação de otimização em tempo real (RTO) em uma usina de moagem de minério simulada. Os métodos de controle e otimização são baseados em um modelo linear dinâmico do processo.

A Figura 3 mostra um circuito típico de moagem que foi utilizado pelos autores para realizar a simulação.

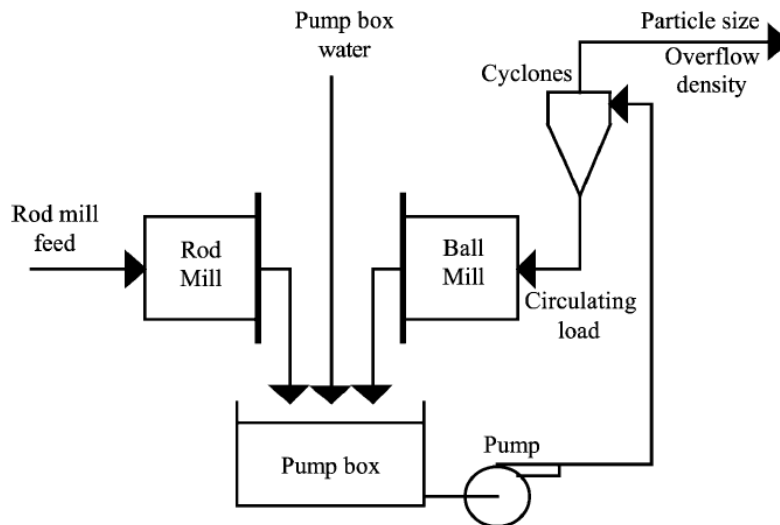


Figura 3. Circuito de moagem típico[5]

O minério é alimentado diretamente ao moinho de barras, que descarrega em uma caixa. A bomba alimenta uma bateria de hidrociclones. O *overflow* do hidrociclone é direcionado para a flotação, e o *underflow* é destinado para a caixa da bomba após passar por um moinho de bolas. Em algumas plantas, um moinho de bolas, um moinho semi-autógeno ou qualquer outro moinho adequado dispositivo pode substituir o moinho de barras. Normalmente, uma operação de moagem deve ser ajustada a fim de entregar uma granulometria ideal para o processo seguinte. Devido a competição que existe entre a granulometria do produto moído, que quanto mais fino tende a gerar um concentrado mais rico, e a capacidade de produção, que aumenta a quantidade de material vendido, a otimização de um circuito de moagem é geralmente formulada como um desses três objetivos:

- Maximizar a produção a uma finura constante;
- Maximizar a finura a produção constante;
- Otimizar uma função ponderada de ambos os objetivos acima.

Lestage, Pomerleau e Hodouin (2002), em [5], baseiam-se em um método de programação linear para encontrar o melhor *setpoint* do controlador como uma função das restrições de operação do processo. O otimizador seleciona valores de *setpoint* que maximizam a taxa de transferência do circuito sujeito às restrições de carga circulante, nível da caixa de bomba e as densidades do *overflow* e *underflow* dos hidrociclones. Os autores acreditam que a estratégia seja aplicável em plantas reais, uma vez que a simulação que foi realizada mostrou que a otimização foi eficiente em maximizar a taxa, mantendo a granulometria do produto em um *setpoint* constante, sem as restrições que foram impostas, exceto durante regimes transitórios. O simulador foi validado em vários dados da planta e foi capaz de imitar distúrbios realistas como variações de granulometria do minério.

Navia, Villegas, Cornejo e Prada (2016), em [6], apresentam uma camada de supervisão com otimização em tempo real que foi implementada em uma coluna de flotação experimental em escala laboratorial para concentração de cobre. Uma

metodologia de dois estágios e de adaptação modificadora para RTO foi comparada pelos autores. Também foi testada e apresentada pelos autores uma reformulação da adaptação modificadora, baseada em gradiente. Os resultados demonstram que a incerteza paramétrica noRTO de dois estágios não foi suficiente para encontrar as condições ótimas do sistema real. A atualização proposta pela metodologia de adaptação modificadora parece ser uma alternativa adequada para encontrar o ótimo do processo sob diferentes fontes de incerteza. Como esperado pelos autores, os métodos de RTO que foram implementados falharam em manter o sistema dentro da região viável durante as transições. Além disso, o desempenho da camada RTO no circuito de concentração completo deve ser estudado para avaliar o efeito de unidades laterais para estimar os benefícios esperados para o processo em geral.

Coetzee e Ramonotsi (2016), em[7], apresentam a atualização do RN MPC (Modelo Preditivo por Controle Robusto Não-linear), que faz parte da plataforma de controle desenvolvida internamente na *Mintek*, chamada *StarCS*, com principal aplicação no circuito de moagem. Foi adicionado ao RN MPC um otimizador em tempo real. O controlador aprimorado foi demonstrado no circuito de moagem primário da mina de platina de Pilanesberg na África do Sul, e o desempenho comparado com a geração anterior, que já estava implementada. Os resultados mostram que o RTO melhorou o desempenho e a estabilidade do processo, bem como aumentou o tempo de execução, eliminando interrupções curtas pelos operadores para intervenção manual.

4 IMPLEMENTAÇÃO DE UM RTO

Uma vez que um processo foi selecionado para ter um RTO implantado, uma declaração apropriada do problema deve ser formulada e depois resolvida. A otimização dos *setpoints* requer dois itens [2]:

- O modelo econômico, uma função objetivo para ser maximizada ou minimizada, que inclui custos e valores dos produtos;
- O modelo operacional, que inclui um modelo de processo de estado estacionário e todas as restrições das variáveis de processo.

Segundo Edgar, Himmelblau e Lasdonem[8], seis passos devem ser seguidos para resolver qualquer problema prático de otimização em tempo real. São eles:

1. Identificar as variáveis do processo: analisar o processo para que as variáveis do processo e características específicas de interesse sejam definidas;
2. Especificar a função objetivo: determinar o critério de otimização e especificar a função objetivo em termo das variáveis definidas no passo 1 juntamente com os coeficientes. Esta etapa fornece o modelo de desempenho, que quando apropriado pode ser chamado de modelo econômico;
3. Desenvolver o modelo do processo e restrições: utilizando expressões matemáticas, é necessário desenvolver um modelo que relaciona as variáveis de entrada-saída do processo e os coeficientes associados, incluindo restrições de igualdade e desigualdade, e utilizando princípios físicos bem conhecidos (balanços de massa, balanços energéticos), relações empíricas, conceitos implícitos, e restrições externas;

4. Simplificar o modelo e a função objetivo: simplificar o modelo para que ele possa ser compatível e resolvido com as técnicas efetivas de solução;
5. Calcular a solução: escolher a técnica de otimização mais adequada ao problema e resolvê-lo;
6. Análise dos resultados: verificar as respostas e examinar a sensibilidade do resultado às mudanças nos coeficientes do problema, a fim de entender aqueles que são mais importantes na obtenção do ótimo.

O modelo de estado estacionário usado no RTO é tipicamente obtido a partir do conhecimento fundamental da planta ou de dados experimentais. Ele utiliza as condições de operação da planta para cada unidade, como temperatura, pressão e taxas de fluxo de alimentação para prever propriedades como rendimentos (ou distribuições) do produto, taxas de produção e características mensuráveis do produto. O modelo econômico envolve os custos das matérias-primas, os valores dos produtos e os custos de produção como funções das condições de operação, projeções de vendas e assim por diante. Os modelos operacional e econômico normalmente incluem restrições sobre as condições operacionais, taxas de alimentação e produção, capacidades de armazenamento e impurezas do produto [2].

Ainda de acordo com [2], no RTO, são executados todos os cálculos de transferência e otimização de dados e enviadas informações de *setpoint* para os controladores. O sistema RTO deve executar todas as tarefas com a planta em estado estacionário. O *software* de otimização pode atualizar os parâmetros do modelo para corresponder aos dados atuais da planta, usando técnicas de regressão. A atualização de parâmetros compensa as mudanças na planta e a degradação do equipamento de processo. É necessário um conhecimento e experiência considerável na planta para decidir quais parâmetros devem ser atualizados e quais dados usar para as atualizações. O departamento responsável pelo planejamento e agendamento deve atualizar os valores econômicos regularmente. O *software* de otimização calcula então os pontos de ajuste ótimos. Se os novos pontos de ajuste ótimos não forem estatisticamente diferentes dos anteriores, nenhuma alteração será realizada no processo.

5 CONCLUSÃO

A busca na literatura sobre a utilização de RTO na mineração retornou poucos resultados de implementações. Dos trabalhos estudados dois foram implementados em processos experimentais, sendo um de moagem e outro de flotação. No terceiro trabalho estudado a implementação também foi realizada em um processo de moagem, porém em uma mina real. Além disso as implementações foram feitas em processos de beneficiamento de cobre e platina. Como pode-se ver as implementações foram realizadas em circuitos isolados e não na planta toda de forma integrada. Todos os casos foram positivos e com melhoras nos processos onde foram realizados. Não foram encontradas na literatura implementações industriais de otimização em tempo real nas demais etapas do processo de beneficiamento de minério de ferro, como por exemplo, britagem, deslamagem. A implementação de um sistema RTO no beneficiamento de minério de ferro é promissora e deverá ser mais estudada para que em futuro próximo possamos ter aplicações reais com resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- 1 Cutler CR, Perry RT. Real time optimization with multivariable control is required to maximize profits. Computers & chemical engineering. 1983 Jan 1;7(5):663-7.
- 2 Seborg DE, Mellichamp DA, Edgar TF, Doyle III FJ. Process dynamics and control. John Wiley & Sons; 2010 Apr 12.
- 3 Darby ML, Nikolaou M, Jones J, Nicholson D. RTO: An overview and assessment of current practice. Journal of Process Control. 2011 Jul 1;21(6):874-84.
- 4 Guimarães JF. Otimização de Processos Aplicada na Indústria. Intech América do Sul. 2011;135(41):1-8.
- 5 Lestage R, Pomerleau A, Hodouin D. Constrained real-time optimization of a grinding circuit using steady-state linear programming supervisory control. Powder Technology. 2002 Apr 29;124(3):254-63.
- 6 Navia D, Villegas D, Cornejo I, de Prada C. Real-time optimization for a laboratory-scale flotation column. Computers & Chemical Engineering. 2016 Mar 4;86:62-74.
- 7 Coetzee LC, Ramonotsi M. Applying StarCS RN MPC with Real-Time Optimiser to Pilanesberg Platinum Mines Primary UG2 Milling Circuit. IFAC-PapersOnLine. 2016 Jan 1;49(20):78-83.
- 8 Edgar TF, Himmelblau DM, Lasdon LS. Optimization of chemical processes. New York: McGraw-Hill; 2001 Jan.