

## DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA OTS PARA MOAGEM VERTICAL\*

Carolina Machado de Castro Amaral<sup>1</sup>  
Cristiano Barcelos Fernandes<sup>1</sup>  
Douglas Rezende Mendonça<sup>1</sup>  
Gabriela Campos Santos<sup>1</sup>  
Mariana Marques Pinheiro<sup>1</sup>  
Paulo Henrique de Miranda Cordeiro<sup>1</sup>  
Joana Bretz de Souza<sup>2</sup>  
Mônica Guimarães Vieira<sup>3</sup>  
Thiago Silveira Formiga<sup>3</sup>  
Gustavo Matheus de Almeida<sup>4</sup>  
Rodrigo Cesar de Miranda<sup>5</sup>

### Resumo

A necessidade de treinamento é uma realidade nas indústrias. A qualificação de operadores é importante para garantir segurança e prevenir perdas econômicas. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é desenvolver e avaliar um simulador de treinamento de operador. O estudo de caso é um moinho vertical, comumente utilizado na indústria de cimento. Nessa direção, passou-se pela construção de um supervisório, pela modelagem e simulação dinâmica de um moinho vertical e, por fim, pela elaboração e execução de um treinamento. Para tal, foram construídos três cenários de situações anormais, além da consideração da operação normal. Ainda em relação à metodologia, treinaram-se dois grupos de alunos com métodos distintos de ensino: o primeiro recebeu apenas um treinamento teórico, através de uma apresentação multimídia; e o segundo, após esse treinamento teórico, recebeu um treinamento prático, ou seja, do tipo aprender fazendo, a partir do contato direto com o simulador de processos. De modo geral, percebeu-se que o contato com a prática possibilitou um maior entendimento da operação do moinho vertical, do grau de dependência entre as variáveis de entrada e de saída, e das variáveis utilizadas para a recuperação do processo à operação normal, contribuindo ainda para uma maior fixação do conhecimento teórico. Esse trabalho é resultado de uma parceria Universidade-Empresa, cujas atividades foram desenvolvidas por um grupo de alunos de graduação em Engenharia Química.

**Palavras-chave:** OTS (Operator Training Simulator); Moinho vertical; Simulação dinâmica; Treinamento de operador.

### DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN OTS SYSTEM FOR VERTICAL GRIND

#### Abstract

The need for training is a reality in industries: adequate qualification for operators prevents security breaches, financial losses and is necessary whenever an operator performs a new role. In the cement industry, especially in milling stages, seeking a higher productivity and a lower operation cost is directly related to well-trained operators. In this context, this paper aims to develop an Operator Training Simulator (OTS) based on a case study of vertical mills for cement industries. By associating supervisory screens and a dynamic simulation of the vertical mill, it was possible to develop an effective simulator that covers theoretical and practical knowledge to train operators in abnormal operation situations. Comparing two training methods, one with just theoretical classes and another with both theoretical classes and practical knowledge acquired by means of the simulator, using an OTS resulted in better prepared operators. These operators felt more confident to make decisions in abnormal and risky situations, which increases productivity and decreases operation costs. This paper is a result of a University-Enterprise partnership and it was made by graduation students of the Chemical Engineer course.

**Keywords:** OTS (Operator Training Simulator); Vertical mill; Dynamic simulation; Operator training.

<sup>1</sup> Engenheiro(a) químico(a), Departamento de Engenharia Química – UFMG, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira química mestre, Fundadora da Optimus Engenharia e CEO da Cinar Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro(a) químico(a), Especialista da Optimus Engenharia, Brasil.

<sup>4</sup> Professor Doutor, Departamento de Engenharia Química – UFMG, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro químico mestre, Fundador da Optimus Engenharia, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O treinamento de operadores é fundamental para aumentar a segurança e reduzir perdas financeiras no ambiente industrial. Segundo Patle, Ahmad e Rangaiah [1], o erro humano é uma das principais causas de acidentes nos processos industriais e, geralmente, é relacionado a um entendimento limitado do processo, a não familiaridade com os riscos associados à função, e a questões técnicas envolvendo a interação entre operadores e equipamentos.

Algumas formas de treinamento são amplamente difundidas nas indústrias, como o aprendizado em sala de aula e o treinamento *on-the-job*. Porém, o aprendizado ineficiente e riscos associados ao treinamento em operação têm levado a popularização de simuladores para treinamento industrial, denominados OTS (*Operator Training Simulator*) [2].

Os simuladores permitem ao operador experimentar a sensação de controlar a planta e lidar com variados cenários que podem ocorrer. Isso se dá por meio de simulações em tempo real tanto de situações de rotina quanto de situações infrequentes, como a partida e a parada de equipamentos. Dessa forma, um sistema OTS proporciona um aprendizado prático e eficiente sem risco à planta e aos operadores [2].

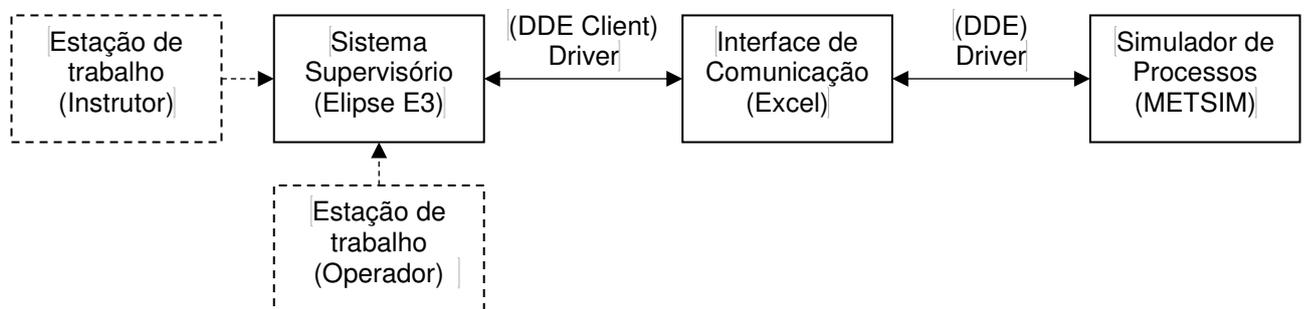
A indústria de cimento está fortemente sujeita às pressões dos custos, dos quais cerca de 50% são gastos com combustíveis e energia elétrica, consumida principalmente nos processos de cominuição [3]. Uma moagem ineficiente, além de impactar no consumo energético, pode causar desvios na adequabilidade do produto às suas especificações finais e aos processos subsequentes [4]. Desse modo, a qualificação adequada dos operadores da etapa de moagem pode aumentar os lucros, a segurança do processo e a qualidade do produto final.

Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo o a elaboração de um OTS para a operação de moagem de cru com moinho vertical em indústrias de cimento. Na sequência, avaliou-se o uso desse simulador em uma atividade de treinamento.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Elaboração do OTS

Os componentes básicos do simulador de moinho vertical para treinamento de operadores e suas interações encontram-se representados na Figura 1.



[Figura 1 – Componentes do sistema OTS e suas interações.]

A partir de uma tela real de supervisor de operação de um moinho vertical, construiu-se uma tela simplificada através do programa E3 Elipse.

Também a partir de um caso-base disponível, montou-se a simulação dinâmica via o programa METSIM da operação de moagem específica para o estudo de caso em questão. Além disso, foi necessário completar a modelagem disponível no programa para o moinho vertical, inserindo novas equações. A principal variável para a elaboração de cenário para treinamento foi a potência do moinho (P), a qual é função da quantidade de material presente no moinho. A expressão inserida para o cálculo da potência é mostrada pela Equação 1 [5].

$$P = \frac{i \times m \times k \times dr \times wr \times dm \times \pi \times n}{60}, [\text{kW}] \quad (1)$$

em que,

- i: Número de rolos do moinho, [-]
- m: Fator de fricção [-]
- k: Pressão específica do rolo [kN/m<sup>2</sup>]
- dr: Diâmetro do rolo [m]
- wr: Largura do rolo [m]
- dm: Diâmetro da mesa de moagem [m]
- n: Velocidade da mesa de moagem [min<sup>-1</sup>]

Com exceção da pressão específica do rolo (k), os valores para as demais variáveis da Equação 1 foram encontrados facilmente na literatura [5]. A relação entre a quantidade de material na mesa e a pressão do rolo é mostrada na Equação 2.1, cujos valores 800 e 0,2 foram determinados por testes até que a potência calculada se aproximasse de valores comumente utilizados na prática industrial. A Equação 2.2 representa a espessura de material na mesa (mm), deduzida a partir do volume do cilindro. Essas expressões foram utilizadas com objetivo didático para a realização do treinamento.

$$k = \frac{800 \text{ mm}}{0,2} \quad (2.1)$$

$$\text{mm} = \frac{v}{\pi \times \left(\frac{dm^2}{4}\right)} \quad (2.2)$$

em que,

- mm: Espessura do material na mesa [m/h]
- v: Quantidade de sólidos dentro do moinho (vazão de alimentação) [m<sup>3</sup>/h]
- dm: Diâmetro da mesa [m]

Em seguida, construiu-se a interface de comunicação entre o simulador de processos e o sistema de supervisão via Excel. É importante ressaltar que nesse trabalho, optou-se por simplificar tanto o sistema de supervisório quanto o simulador do processo, facilitando assim o entendimento dos usuários.

## 2.2 Treinamento

Após o desenvolvimento do sistema OTS, elaborou-se um treinamento de moinho vertical de maneira a se avaliar a influência do simulador na aprendizagem. Esse treinamento foi aplicado em 10 alunos do primeiro período do bacharelado em Engenharia Química da UFMG, que foram divididos em dois grupos de 5 pessoas. O primeiro grupo passou apenas por um treinamento teórico, enquanto o segundo, além do mesmo treinamento teórico, passou ainda pelo treinamento prático, no qual tiveram contato com o simulador.

O treinamento teórico, em forma de aula expositiva com recursos multimídia, abordou tópicos sobre o processo de produção de cimento, a moagem e o moinho vertical,

incluindo suas principais variáveis de operação e como resolver problemas comuns de operação. Esse treinamento durou cerca de uma hora, sendo ministrado a todos os 10 alunos.

Apenas para um subgrupo de 5 alunos, o treinamento prático, com duração aproximada de meia hora, forneceu uma visão geral do simulador, de modo a familiarizá-los com o sistema. Na sequência, esses alunos foram submetidos aos cenários de falha (uma por vez) a partir do sistema OTS desenvolvido.

A Tabela 1 mostra os três cenários de falhas desenvolvidos, comumente encontrados durante a operação de moinhos verticais.

Tabela 1 - Cenários de falhas simulados, além da operação normal.

Cenário	Descrição	Objetivo	Ação Esperada
1	Aumento da potência.	Relação entre a alimentação e a potência do moinho.	Reduzir a alimentação de cru para o moinho.
2	Aumento repentino da temperatura de entrada do gás.	Influência da água na temperatura de saída do moinho.	Aumentar a vazão de água para o moinho.
3	Aumento gradativo da temperatura de entrada do gás.	Limite máximo da vazão de água para controle da temperatura de saída do moinho.	Aumentar a vazão de água para o moinho (não é suficiente para controle do processo).

Na sequência, com o objetivo de avaliar a diferença de aprendizado entre os dois grupos de alunos, um teste contendo quatro questões de múltipla escolha e uma questão aberta foi aplicado em ambos os grupos. Além do teste escrito, foi pedido aos alunos que dessem suas opiniões quanto aos treinamentos teórico e prático e suas impressões frente à utilização do simulador como forma de aprendizado.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 OTS

Primeiramente, construiu-se uma tela simplificada, também chamada de Interface Homem-Máquina (IHM), representando o supervisório real da operação de moagem de cimento com moinho vertical, a qual pode ser visualizada na Figura 2.

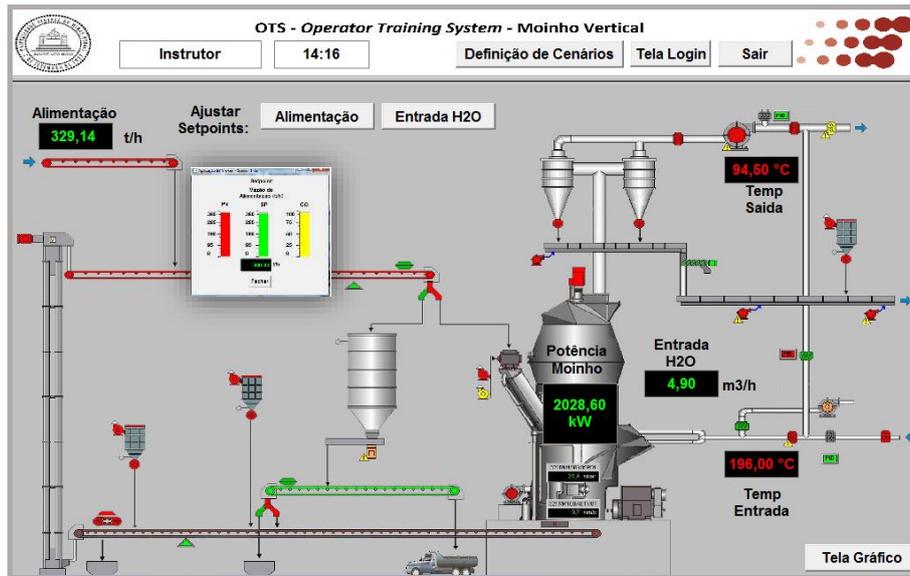


Figura 2 – Tela principal do sistema de supervisório.

Os principais elementos dessa tela são: (1) o botão *Definição de Cenários*, que permite ao usuário escolher entre os diferentes cenários construídos; (2) e os botões de *setpoint*, essenciais para que os valores de referência sejam estabelecidos de uma forma segura. Os *setpoints* são relativos à vazão de alimentação (botão *Alimentação*) e a vazão de água para o moinho (botão *Entrada H2O*). Essa tela principal ainda contém itens relativos à segurança de acesso (botão *Tela Login*) e à identificação do usuário (*Instrutor*).

Os valores das variáveis em cada monitor e os alarmes variam de cor para facilitar a identificação de problemas pelo operador e gerar reações mais rápidas. A cor verde indica que a variável está dentro da faixa esperada; a cor amarela indica um problema de severidade média (níveis *Low* e *High*) e a cor vermelha um problema de severidade alta (níveis *LowLow* e *HighHigh*).

Em seguida, foi desenvolvida a simulação dinâmica do processo. Para tanto, criou-se um modelo simplificado do processo de moagem de cru representando os principais equipamentos e correntes de entrada e saída, que pode ser visto na Figura 3. Foram utilizados dois controladores de vazão: um na alimentação, que determina o valor da vazão de entrada da matéria-prima, e um na corrente de água, que determina a vazão de água para o moinho. Ambos os controladores recebem os respectivos valores de *setpoint* inseridos pelo operador na IHM.

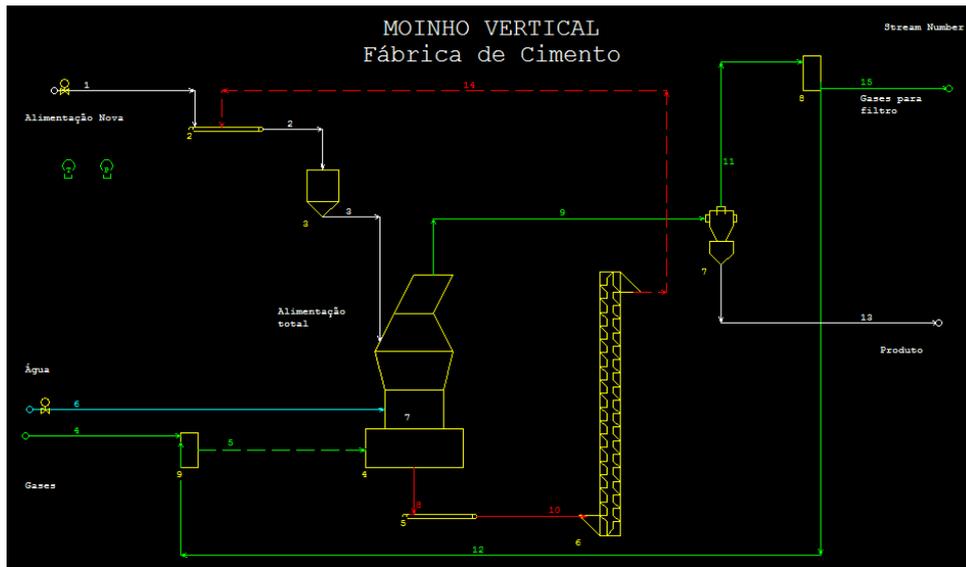


Figura 3 – Tela do simulador dinâmico para a operação de moagem de cru.

Com o sistema construído, foi possível representar didaticamente a operação de um moinho vertical. Além disso, mesmo com a simplificação da IHM e da simulação do processo, a sensação de se operar o equipamento foi mantida.

### 3.2 Treinamento

Os testes mostraram que o rendimento médio dos alunos de ambos os grupos foi acima de 80%. Ou seja, mesmo os alunos treinados apenas com o treinamento teórico foram capazes de responder as perguntas corretamente. De acordo com os depoimentos, o treinamento teórico foi suficiente para explicar os conceitos necessários para a realização do teste escrito, independentemente da realização do treinamento prático.

Isso pode ser explicado pela simplicidade das questões elaboradas, as quais não exigiam um entendimento tão específico do processo. Uma avaliação mais detalhada da performance de cada um dos participantes, como feita por Nazir, Kluge e Manca [6], permitiria uma resposta mais apurada em relação a eficiência do sistema de treinamento. Entretanto, o tempo disponível para os treinamentos foi muito pequeno, não permitindo uma abordagem aprofundada do tema e uma avaliação mais precisa do nível de retenção do conhecimento.

Apesar disso, assim como observado por Müller-Pfeiffer, Jäger e Bonermann [7], foi possível observar que os alunos puderam assimilar melhor as relações entre as variáveis controladas e as variáveis manipuladas, o que levou a um aumento no entendimento do processo.

Outro ponto importante citado pelos alunos foi que o treinamento com simulador permite a fixação do conteúdo por um maior período de tempo, como também foi relatado por Alves, Haydu e Souza [8].

## 4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi construído um simulador para treinamento de operadores de um moinho vertical. Mesmo com todas as dificuldades superadas ao longo do desenvolvimento do OTS, o sistema elaborado atendeu os objetivos principais, sendo possível elaborar um treinamento e avaliar, de modo incipiente, a sua eficácia.

Apesar das simplificações feitas no OTS, a experiência da operação do equipamento foi mantida e foi possível perceber, do ponto de vista qualitativo, que a utilização de um simulador teve um efeito positivo na aprendizagem, assim como observado na literatura. Segundo depoimentos, a fixação do conteúdo de maneira efetiva e duradoura só foi possível com um entendimento real do processo, o que foi alcançado com a utilização do simulador.

Como sugestões de trabalhos futuros, citam-se a criação de outros cenários, a aplicação de um treinamento estruturado, e uso de métodos quantitativos de avaliação de eficácia.

## REFERÊNCIAS

- 1 Patle S. D., Ahmad Z., Rangaiah G. P. Operator training simulators in the chemical industry: review, issues and future directions. *Chemical Engineering*, 30(2), p. 199-216, 2013.
- 2 Nazir S., Colombo S., Gallace A., Bordegoni M., Manca, D. Performance comparison of different training methods for industrial operators. In: WAARD, D. et al. *Human factors: a view from an integrative perspective*. Proceedings HFES Europe Chapter Conference Toulouse. 2012.
- 3 Cimento.org: Cimento no Brasil [página da internet]. [acesso em 26 nov. 2015]. Disponível em: <http://cimento.org/cimento-no-brasil/>
- 4 Krüger, F. L. – *Corpos Moedores Côncavos*. [Tese de doutorado] Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2004.
- 5 Duda, Walter H. *International Process Engineering in the Cement Industry*. Vol.1. 3a ed. French & European Pubns, 1985.
- 6 Müller-Pfeiffer M, Jäger G, Bornemann J. Experience with the SIMULEX cement plant training. KHD Humboldt Wedag. 2003.
- 7 Nazir S, Kluge A, Manca D. Can immersive virtual environment make the difference in training industrial operators? In: Waard D, Brookhuis K, Wiczorek R, Nocera F, Brouwer R, Barham P, et al. *Proceedings of the human factors and ergonomics society Europe chapter 2013 Annual Conference*. 2014.
- 8 Alves J B, Haydu N B, Souza R M. O uso de simuladores para treinamento em áreas de alta periculosidade – Case simulador de guindastes Petrobrás. In: *Trilha de Games & Cultura*. Anais do 9 SBGames; 2010; Florianópolis, Brasil. p. 161-169