

CONTROLE OTIMIZADO DO PROCESSO DE MOAGEM DE UM MOINHO DE BOLAS POR INVERSOR DE FREQÜÊNCIA POR LABVIEW

Daniel Akihiro Anabuki

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

João Marcelo Kuae

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Carlos Gurgel Borba

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Dário Pessoa Ferraz

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Marcelo Eduardo Alves Olinda de Souza

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Armando Hideki Shinohara

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Pedro Luiz Guzzo

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Severino Leopoldino Urtiga Filho

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo estudar o processo de controle da velocidade de moagem em moinho de bolas através do uso de inversor de freqüência controlado pelo hardware Compact Fieldpoint e pelo software LabVIEW. Para isso, foi avaliada a performance do aplicativo gerado em LabVIEW para controle de velocidade no processo de moagem. A utilização de inversor de freqüência possibilitou gerar combinações de diferentes velocidades com diferentes condições de preenchimento do moinho, avaliando assim a moagem para cada uma das condições operacionais e determinando os pontos de ocorrência de deslizamento, efeito cascata, e efeito da aceleração centrífuga.*

Palavras Chaves: moinho de bolas, controle de moagem, inversor de freqüência, LabVIEW, Compact Fieldpoint, Interface Homem-Máquina.

1. INTRODUÇÃO

O processo de moagem em moinho de bolas é um processo largamente usado nas indústrias cerâmicas para obtenção de matéria-prima com granulometria adequada. O processo de moagem é um processo baseado em impacto e abrasão visando a redução do tamanho das partículas de forma a satisfazer as necessidades granulométricas das etapas posteriores. Parâmetros como velocidade de rotação, taxa de preenchimento, tipo e quantidade de bolas e materiais a serem moídos, afetam o processo de moagem, tornando-o complexo e alvo de estudos recentes. (Watanabe, 1999) (Dong & Moys, 2001).

O processo de moagem ocorre quando existe movimento relativo entre as bolas e o material a ser moído. Esse movimento é gerado pela rotação do moinho e desta forma o material passa a ser cominuído entre as bolas ou na interface das bolas com a parede do moinho. A probabilidade e a condição para que as partículas sejam quebradas dependem da intensidade do impacto, seja ela causada pela força do impacto em si ou pela energia cinética do impacto. A maximização desses impactos ocorre com o efeito denominado “cascata” ou “catarata”, mostrado na Figura 1, onde as bolas e o material se movimentam de forma a alcançar uma determinada altura do moinho e tombarem, esmagando o material que se encontra na parte inferior do cilindro. (Dong & Moys, 2001).

Forma Básica	Movimento de Deslizamento		Movimento de Cascata			Movimento de Catarata		
	Subtipo	Deslizar	Precipitação	Escorregando	Rolando	Cascata	Catarata	Centrifuga
Esquemático								
Processo Físico		Deslizamento		Mistura			Esmagando	Centrifuga

Figura 1. Diagrama mostrando as etapas do movimento relativo do material cominuído em função da velocidade de rotação do moinho. A velocidade de rotação aumenta da esquerda para direita.

Para se alcançar a condição onde o efeito de moagem seja adequado, é necessário ter um controle rigoroso da velocidade de rotação. Determinar a velocidade adequada passa a ser uma prioridade para realizar o processo de moagem de forma otimizada e eficiente, maximizando assim os efeitos acima descritos.

O objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver o controle do moinho de bolas através de controle do motor de indução trifásico por um inversor de freqüência, sendo este último controlado por software e hardwares de controle, quais sejam LabVIEW e Compact Fieldpoint, respectivamente. Uma gama de velocidades pode ser testada sem haver a necessidade de gerar alterações físicas nas instalações.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O diagrama da Figura 2 mostra como foi feita a disposição dos equipamentos para execução do experimento para dois modos de operação: (i) IHM (painel e display) instalada no inversor de freqüência e alterado manualmente; (ii) acesso remoto com LabVIEW e Compact Fieldpoint, através do protocolo ethernet para controle e monitoração via computador com o programa

LabVIEW. A seguir, descrevemos o princípio de funcionamento dos principais equipamentos utilizados no controle do moinho.

2.1. Inversor de Freqüência

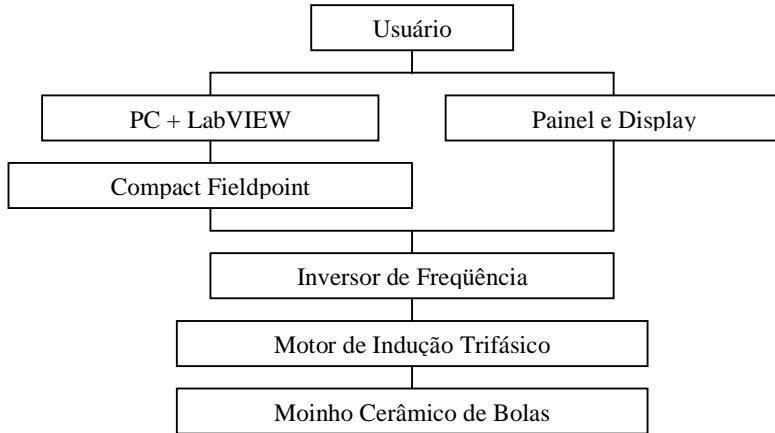


Figura 2. Diagrama de blocos dos equipamentos para o ensaio do moinho de bolas.

O inversor de freqüência, também conhecido como conversor de freqüência, é utilizado para controle de motores elétricos. A operação do motor é alterada de acordo com a necessidade, por exemplo, aumento ou diminuição da velocidade, redução ou acréscimo de torque, mudança de direção de rotação. Essas alterações são feitas através de mudanças nos parâmetros de fornecimento de energia para o motor de indução trifásico, obtendo assim um controle flexível do motor de indução trifásico.

Os métodos industriais mais utilizados são baseados em controle do tipo escalar e vetorial, este último tem precisão dependente da utilização de algoritmos complexos baseados em modelos matemáticos de motores elétricos. Com estas metodologias, é possível obter resultados de operação do motor com precisão, sem haver a necessidade de se acoplar sensores para garantir que as condições operacionais sejam satisfeitas. O uso de tal metodologia só foi possível com o desenvolvimento de equipamentos que pudessem simplificar o uso de tais modelos matemáticos para que o controle do motor trifásico pudesse ser otimizado para o usuário final (Rockwell Automation, 1997).

Com o advento dos inversores de freqüência, foi possível alcançar um novo nível de controle interligando os motores aos sistemas de controle; sejam eles controladores lógicos programáveis (CLP), computadores ou hardwares de controle, ou então interfaces mais adequadas de controle remoto ou local. Existem vários métodos de controle que podem ser utilizados, protocolos de transmissão, recursos variados para realização do controle do inversor de freqüência, variando desde de soluções mais simples até as mais complexas.

2.2. Software LabVIEW

O LabVIEW é um software mundialmente conhecido que utiliza uma linguagem de programação visual que oferece as vantagens de uma programação mais intuitiva, recursos mais elaborados e vantagens de programação baseada em diagramas de blocos. O fluxo de informações e a metodologia de programação é visual e interligada. O diagrama de fluxo permite o acompanhamento da direção das informações. Com esta forma de programação, reduz-se o tempo destinado à elaboração do programa a ser executado, disponibilizando assim mais tempo para a elaboração dos experimentos propriamente ditos.

Além do LabVIEW, foram utilizados os seguintes softwares complementares: MAX (Measurement Acquisition Explorer), LabVIEW RT (Real-time), e LabVIEW DSC (Datalogging and Supervisory Control) . A programação em LabVIEW permite gerar um painel de controle virtual para a operação do motor trifásico através do inverter de freqüência. Por sua vez, o inverter de freqüência encontra-se acoplado ao hardware de controle ligado ao computador via ethernet.

2.3 Compact Fieldpoint

O hardware utilizado para realização do controle do moinho de bolas foi o Compact Fieldpoint (cFP) fabricado pela National Instruments (USA) mostrado na Figura.3(a). O cFP é um hardware utilizado para aplicações onde existe a necessidade de um equipamento robusto. Várias combinações de placas de entrada e saída, sejam digitais ou analógicas; e recursos mais elaborados que um CLP industrial, comumente usado. O cFP pode ser utilizado de duas formas: a primeira sendo uma interface entre o processo e o computador (PC) usando LabVIEW; a segunda como um controlador local do processo, com o sistema operacional LabVIEW Real-Time junto com o aplicativo gerado em com a programação LabVIEW.

O módulo controlador do cFP utilizado foi o processador de tempo real cFP-2020 com portas de comunicação serial ou de redes (protocolo ethernet). Este dispositivo suporta até 8 placas de aquisição de dados. As placas de aquisição de dados utilizadas no controle do moinho de bolas foram módulos de chaveamento por relés (cFP-RLY-421), para controle de partida e parada do motor, e controle de sentido de rotação. O módulo de saída analógica de 0 a 10V (cFP-AO-210) foi para controlar a velocidade de rotação, todos esses módulos ligados à placa de comando do inverter de freqüência CFW-08, mostrado na Figura.3(b).

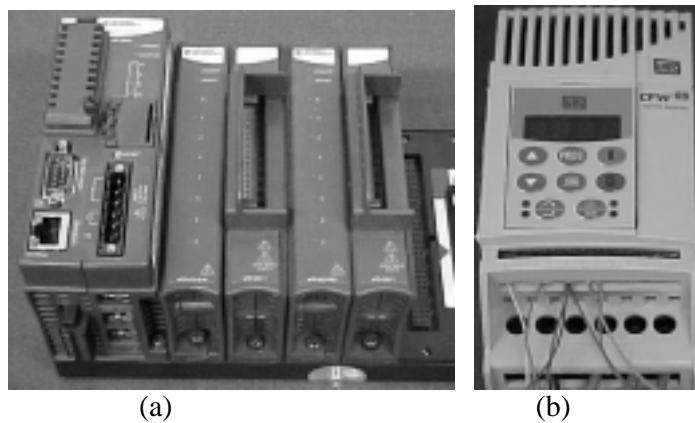


Figura 3. (a) Compact FieldPoint, National Instruments; (b) Inversor de freqüência CFW-08, WEG.

2.4 Moinho de Bolas

O comportamento das esferas usadas no processo de moagem têm características específicas que dependem do material a ser moído, das reações químicas, da velocidade e da taxa de preenchimento do moinho. A soma de todas essas variáveis afeta o processo e são de grande complexidade e alvo de vários estudos. Para cada tipo de material, existe uma condição adequada para moagem, que vai desde velocidade de revolução do moinho ao tipo de esfera para moagem. A concordância entre esses parâmetros é que oferece um processo de moagem mais eficiente. Um dos parâmetros mais estudado para o controle do processo de moagem é a velocidade de rotação. (Tarasiewicz & Radziszewski, 1990).

O moinho utilizado para execução do experimento foi o moinho de alta alumina de 5,5 litros para moagem e mistura de matérias-primas em escala de laboratório fabricado pelas NGK do Brasil. O moinho apresenta as características físico-químicas descritas na Tabela 1, fornecida pelo fabricante.

Tabela 1. Características físico-químicas do moinho cerâmico de bolas.

Al ₂ O ₃ (%)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Resistência Mecânica Flexão(MPa)	Dureza Rockwell 15 N	Resistência ao Impacto	Resistência à abrasão
87	3,5	3/4 0,1	250	90	Boa	Ótima

A figura 4. apresenta os componentes do moinho de bolas. É também apresentado um desenho esquemático e dimensional do moinho empregado.

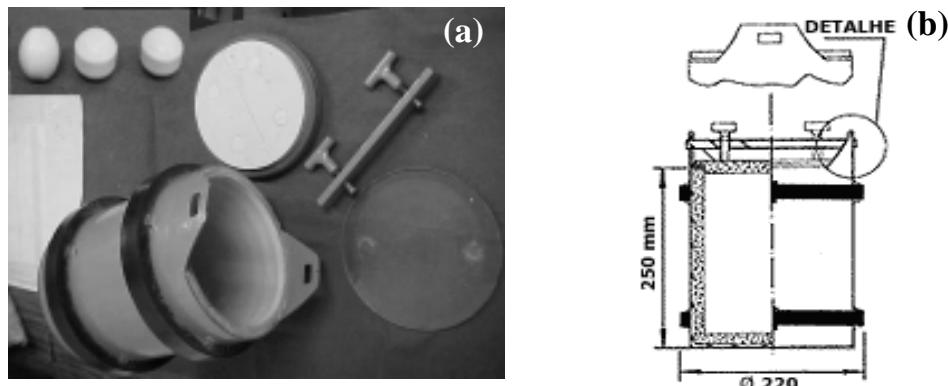


Figura 4. (a) Componentes do moinho de bolas; (b) detalhes dimensionais (NGK do Brasil).

A mesa para acionamento do moinho de bolas foi projetada e construída com dimensões em escala laboratorial, sendo adotada a relação de transmissão de movimento para o moinho de bolas de 1 para 6,3. O esquema deste dispositivo é mostrado na Figura 5. O motor de indução trifásico usado foi o motor de 0,5 CV de 220Volts controlado diretamente pelo inversor de freqüência CFW-08 *Vector Inverter*, ambos da empresa WEG do Brasil. Este inversor foi utilizado com dois tipos de Interfaces Homem-Máquina (IHM): painel local e acesso remoto no PC via o hardware cFP.



Figura 5. Mesa confeccionada para os ensaios com o moinho de bolas.

O moinho foi ensaiado com taxas de preenchimentos de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% do volume total do cilindro para o estudo da condição ótima de moagem. A velocidade de rotação foi variada entre 24 a 314 rpm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio do moinho de bolas foi analisado o comportamento das esferas usadas para moagem, assim como a performance do sistema de controle montado para o moinho de bolas. Com o uso do inversor foi possível gerar diferentes combinações de velocidades e de preenchimentos para determinação da melhor condição operacional do moinho de bolas. Através do inversor de frequência acoplado ao cFP foi possível interligar o moinho de bolas ao computador e realizar o controle do processo de moagem remotamente via aplicativo gerado em LabVIEW.

Com o aplicativo desenvolvido no LabVIEW, foi possível emular os controles do inversor de freqüência de forma mais elaborada através de painéis interativos que demonstram os estados do motor de forma mais visual no monitor do computador. O diagrama da Figura 6 representa a lógica do aplicativo, e a direção do fluxo de dados. Cada um dos ícones representa um conjunto de instruções e comandos para operação do aplicativo. O painel da Figura 7 disponibiliza os comandos de acionamento podendo assim dar partida e parada do motor, inverter o sentido de giro, aumentar ou diminuir a velocidade, e monitorar a velocidade de rotação. Foram criados ainda alertas de limites de rotação do motor, indicação do sentido de rotação e status do motor (ligado ou desligado) ampliando assim o monitoramento do sistema. Existe a possibilidade de desenvolver ainda mais o programa, de forma a implementar ou personalizar o aplicativo conforme as necessidades.

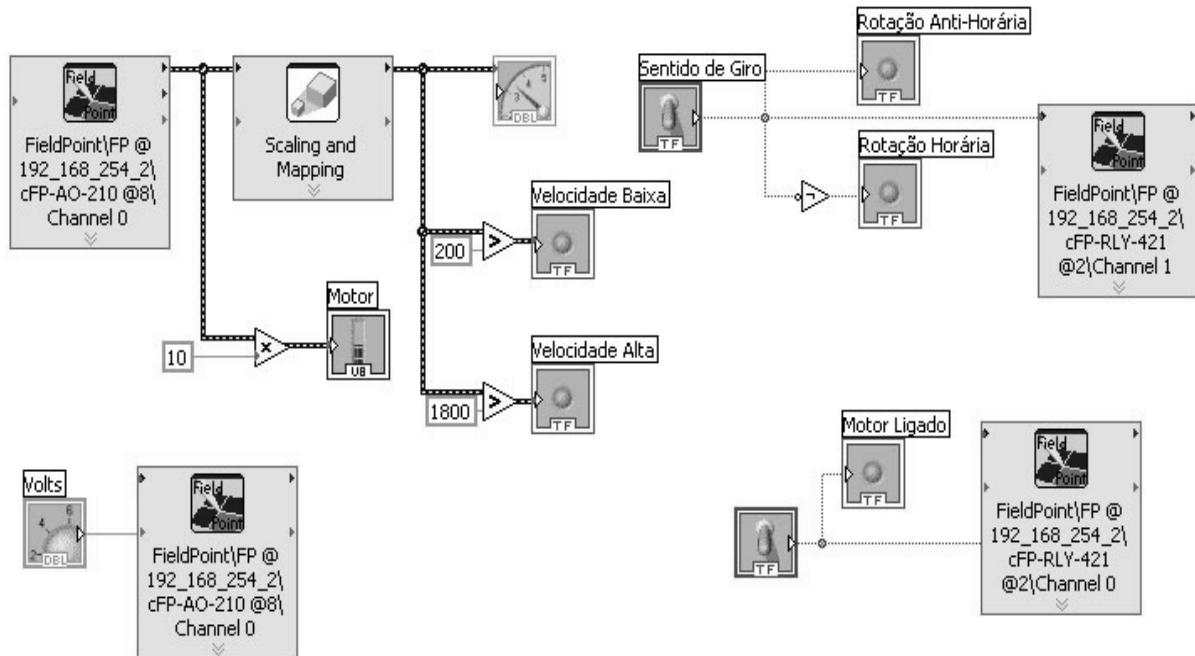


Figura 6. (a) Diagrama de blocos do aplicativo gerado pelo LabVIEW.

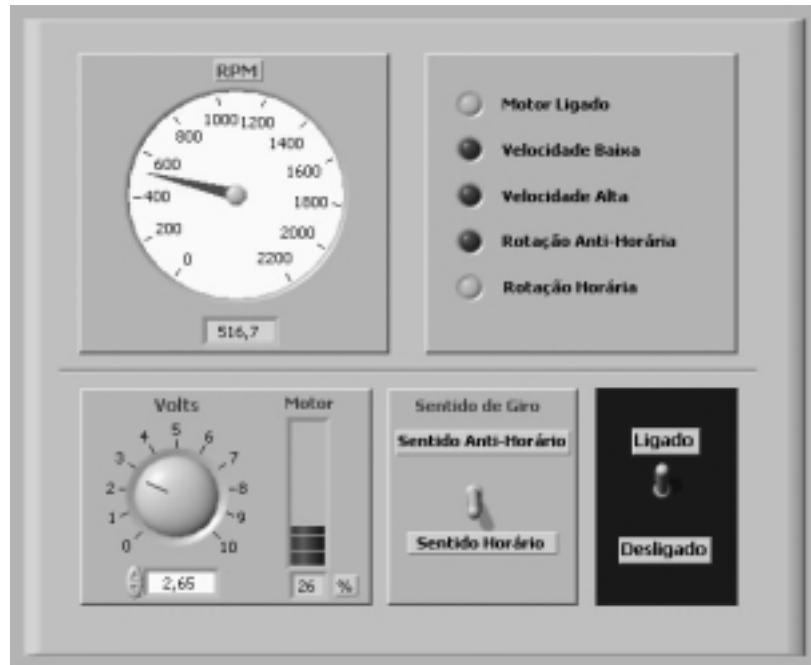


Figura 7. Painel do aplicativo criado pelo LabVIEW com características funcionais e intuitivas.

Com o uso combinado dos equipamentos descritos foi possível atingir um resultado satisfatório no controle da velocidade de rotação do processo de moagem. Durante os experimentos, puderam ser acompanhados a velocidade do motor de indução trifásico na IHM do inversor de freqüência e na IHM do aplicativo gerado pelo LabVIEW. Foi observado uma diferença entre as leituras das interfaces de até 2 rpm, correspondendo a um erro de aproximadamente 0,001%. As variações de velocidade foram feitas via de painel de acesso local, ou via protocolo ethernet através do hardware compact fieldpoint e software LabVIEW. Cabe destacar a importância do uso de inversor de freqüência para especificação da velocidade. A utilização do inversor de freqüência que dispensa o uso de sensores para o *feedback* da velocidade, torque e carga. Esta tecnologia, denominada *Sensorless*, garante uma condição operacional igual ou muito próxima ao que foi especificado pelo usuário.

Os ensaios foram realizados com o moinho de bolas sem carga de material a ser moído, apenas presente as esferas para verificação do comportamento da moagem. Com os ensaios, mostrados na Figura 8, puderam ser observadas as várias fases ocorrentes durante o processo de moagem, desde o deslizamento causado pela baixa velocidade (imagens a), até o efeito cascata e catarata que onde o processo atinge a melhor condição de operação de moagem (imagens b), onde o efeito de impacto entre as esferas e o material a ser moído é maximizado. Finalmente, pode ser observada a condição das esferas posicionadas nas paredes do moinho causado pela aceleração centrifuga devido à alta velocidade (imagens d); e uma condição de deslizamento em alta velocidade (imagens c).

Com o levantamento de dados do processo de moagem gerou-se um gráfico que possibilita demonstrar o comportamento das curvas de início do efeito cascata, inicio do efeito da aceleração centrífuga, e deslizamento de alta velocidade. Este gráfico é mostrado na Figura 9.

Durante os ensaios com velocidades elevadas foi verificada uma fase entre o efeito cascata e efeito da aceleração centrífuga onde o material passava a deslizar no fundo do moinho, de forma similar a condição de baixa velocidade, que pode ser caracterizado como um indicativo para o término do efeito cascata e inicio do efeito da aceleração centrífuga.

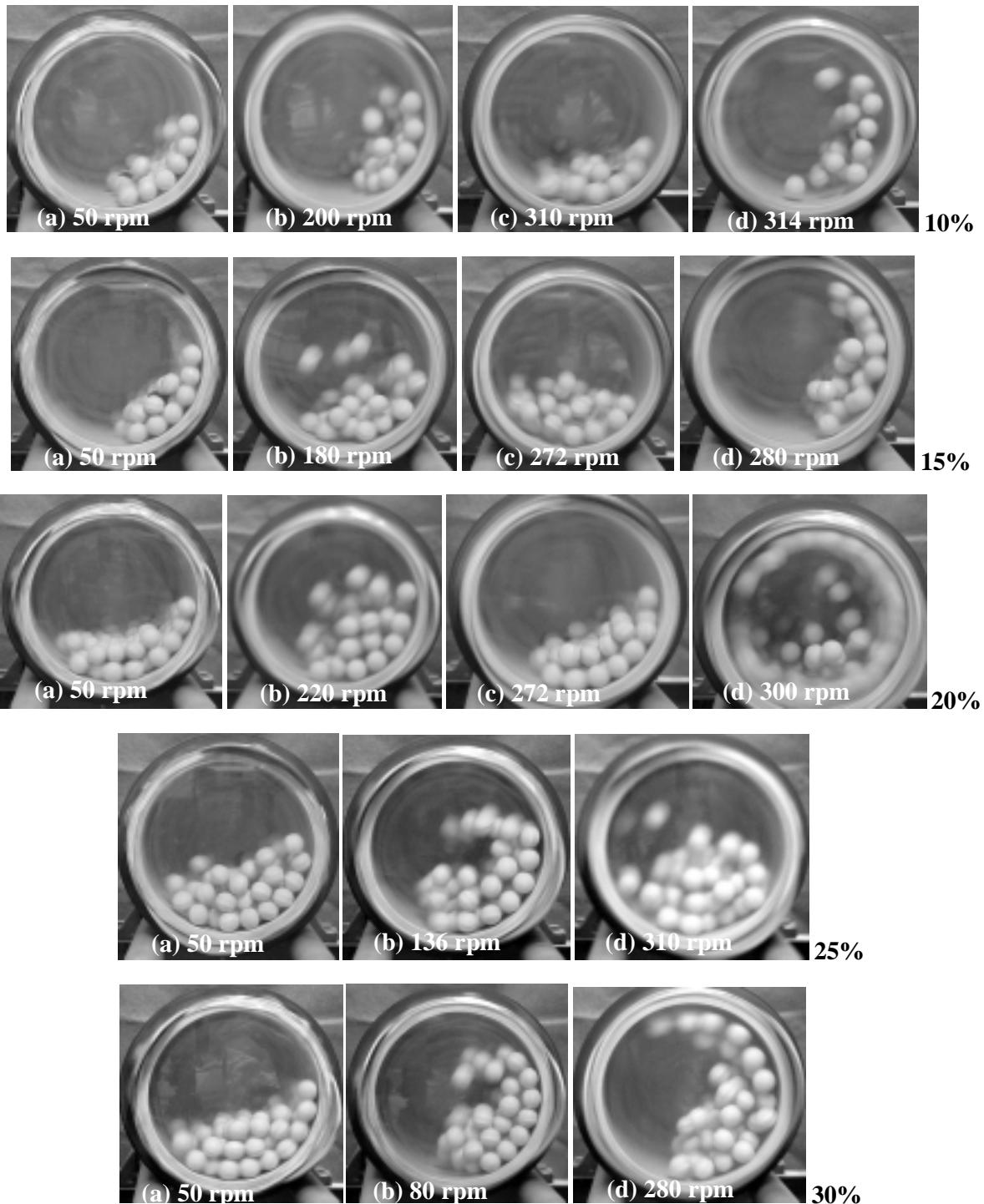


Figura 8. Imagens mostrando a mudança no regime de moagem em função da rotação e do fator de preenchimento do moinho.

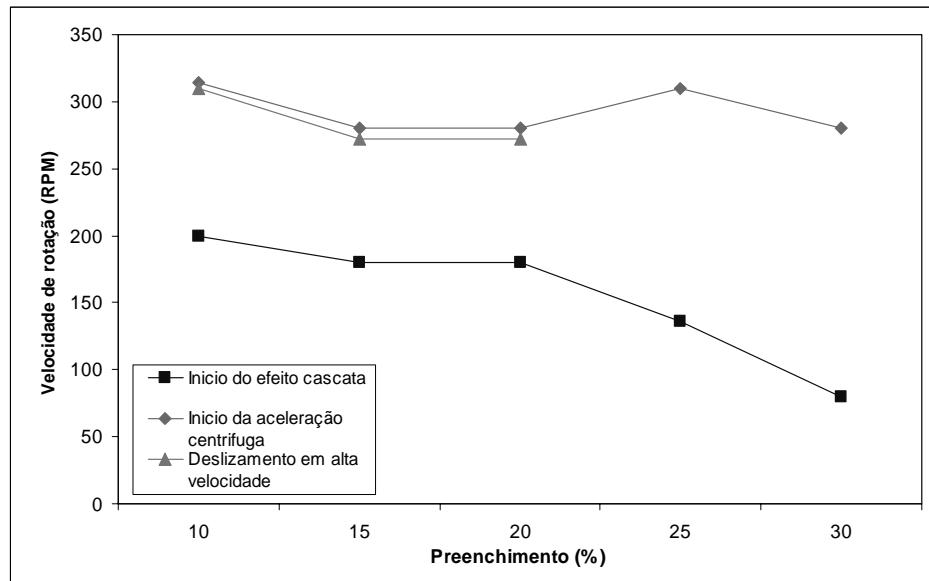


Figura 9. Efeito da porcentagem de preenchimento do moinho de bolas sobre a velocidade de rotação na qual ocorre o efeito cascata, efeito da aceleração centrífuga, e deslizamento em alta velocidade.

4. CONCLUSÕES

O controle da velocidade nos processos de moagem com o uso de inversor de freqüência apresentou um resultado satisfatório, sendo possível efetuar a variação da velocidade entre 24 e 314 rpm sem a necessidade de realizar alterações na planta de operação. Com o inversor fazendo o controle do motor, pode-se interligar o inversor a um sistema de controle para a operação remota através do hardware Compact Fieldpoint, de forma a implementar um controle mais elaborado e automatizado do processo via LabVIEW.

O uso do LabVIEW e o do Compact Fieldpoint permitiu um controle e uma monitoração flexível em condições operacionais mais eficientes. O aplicativo gerado com o LabVIEW permitiu uma nova forma de visualização do processo. Fazendo uso da abordagem gráfica do LabVIEW foi ser gerado um painel virtual onde os comando do inversor de freqüência foram emulados de forma clara e intuitiva, facilitando assim o entendimento e o monitoramento do processo por parte do operador. Com o sistema de controle implementado é possível condicionar o processo a um banco de dados, realizar implementações, ou ampliar as capacidades do experimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Capes, ao CNPq a FINEP; aos bolsistas Cláudio Vinícius Duarte Cabral e Rodrigo José Gomes da Silva e ao técnico Francisco Moura da Cruz Neto.

6. REFERÊNCIAS

- Watanabe, H., 1999, "Critical Rotation Speed for Ball-milling", Powder Technology, 104, pp. 95-99
 Tarasiewicz, S. and Radziszewski, P., 1990, "Grinding Process simulation in a ballmill", Mathl Comput. Modelling, vol.14, pp. 1072-1074, Quebec, Canada.
 Dong, H. and Moys, M.H., 2001, "A technique to measure velocities of a ball moving in a tumbling mill and its applications", Minerals Engineering, Vol. 14, N° 18, pp. 841-850, South Africa.

Rockwell Automation – Allen-Bradley, 1997, "A tecnologia Sensorless Vector: O que separa essa tecnologia das outras?", Publicação 1336SV-1.5PT, Outubro.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Optimized Control of Ball-milling Grinding Process by a Frequency Inverter

Daniel Akihiro Anabuki

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

João Marcelo Kuae

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Carlos Gurgel Borba

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Dário Pessoa Ferraz

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Marcelo Eduardo Alves Olinda de Souza

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Armando Hideki Shinohara

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Pedro Luiz Guzzo

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Severino Leopoldino Urtiga Filho

Federal University of Pernambuco – Technological and Geosciences Center - Mechanical Engineering Department – Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE.

Abstract. *The aim of the present work is to develop a control system for the rotation of a laboratory-size ball-mill by using a frequency inverter coupled with the Compact Fieldpoint hardware and the LabVIEW software. The frequency inverter was used to monitor rotations ranged from 24 to 314 rpm. The rotation, the program was evaluated under different fill-factors for the mill. The transition from sliding to cascade regime was observed and was dependent of the fill-factor.*

Keywords: *ceramic ball-mill, milling control, frequency inverter, LabVIEW, Compact Fieldpoint.*