

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**APLICAÇÃO DO CONTROLE DE UM PROCESSO DE MOAGEM EM MOINHO
DE BOLAS ATRAVÉS DO SISTEMA LABVIEW-COMPACT FIELDPOINT-
INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AUTOR: DANIEL AKIHIRO ANABUKI
ORIENTADOR: PROF. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA**

RECIFE, FEVEREIRO DE 2005

Anabuki, Daniel Akihiro

Aplicação do controle de um processo de moagem em moinho de bolas através do sistema LabVIEW-Compact Fieldpoint-Inversor de frequência / Daniel Akihiro Anabuki. – Recife : O Autor, 2005.
viii, 66 folhas : il., fig., tab., gráf.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Mecânica, 2005.

Inclui bibliografia e anexos.

1. Engenharia mecânica – Materiais e fabricação. 2. Processo de moagem – Aplicação do controle. 3. Programas de controle – Sistema LabVIEW - Compact Fieldpoint – Inversor de frequência. I. Título.

67.02
666

CDU (2.ed.)
CDD (22.ed.)

UFPE
BC2005-066

“APLICAÇÃO DO CONTROLE DE UM PROCESSO DE MOAGEM EM MOINHO
DE BOLAS ATRAVÉS DO SISTEMA LABVIEW-COMPACTFIELDPOINT-
INVERSOR DE FREQUÊNCIA”.

DANIEL AKIHIRO ANABUKI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE


Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
ORIENTADOR/PRESIDENTE


Prof. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)


Prof. Dr. DELSON TORIKAI (USP)

**À minha família tão querida,
E aos meus amigos tão importantes.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram direta e indiretamente de minha cruzada para conquista do título de Mestre. Foi uma busca difícil com muitos obstáculos e dificuldades em todas as etapas. Sem a ajuda de todos que estiveram comigo, me apoiando e me ajudando, em momentos felizes e em momentos que fraquejei frente aos problemas, talvez eu não estivesse aqui. As pessoas que me ajudaram com certeza reconhecerão sua contribuição nas linhas do trabalho que eles, tão prontamente, me ajudaram a escrever.

Agradeço em especial e do fundo do meu coração,
À minha família tão amada,
Aos meus amigos que sempre estão comigo,
Aos companheiros que trilharam os mesmos caminhos.

Agradeço os esforços,
Ao meu orientador Professor Armando Hideki Shinohara,
Aos Professores Pedro Luiz Guzzo e Severino Leopoldino Urtiga Filho;
Aos Professores Dário Pessoa Ferraz e Laurênio Accioly.

Agradeço o apoio,
À Universidade Federal de Pernambuco,
Ao Departamento de Engenharia Mecânica
Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES,
À FVA/FINEP (Através do Convênio 22.01.0480.00 – Estudo de Calcinação da Gipsita no Forno a Gás Natural e GLP e Instrumentado)

*“A cada passo me aproximo mais de meu destino
E de teu coração, mesmo sem saber teu nome e meu caminho.
Por entre trilhas da vida sigo minha ilusão até alcançar
As estrelas que formam minha estrada até ti chegar” .*
Daniel Akihiro Anabuki

*“Estudei ardentemente tanta Filosofia,
Direito e Medicina
E infelizmente muita Teologia,
Tudo investiguei, com esforço e disciplina,
E assim me encontro eu, qual pobre tolo, agora,
Tão sábio e tão instruído quanto fora um dia!
Primeiro fui assistente e em seguida doutor;
Dez anos ensinando; autêntico impostor.
A subir e a descer por todos os lados
Estudantes à volta em mim sempre grudados
E chego ao fim de tudo ignorante de tudo!
Coração a ferver! Para que tanto estudo!
Não supero em Saber os tolos e doutores,
Nem sei mais do que os mestres, padres e escritores.
Dúvidas? Escrúpulo? De tudo já dei cabo.
Não mais me assombra o Inferno, e nem o Diabo;
Fugiu todo o prazer de minha adolescência,
Não me interessa mais do Direito a Ciência,
Nem a tarefa árdua de ensinar,
Aos homens converter e doutrinar.
Não ganhei dinheiro, quase não tenho nada,
Nem a glória do mundo e seus doces prazeres...”*

Trecho do livro Fausto de J.W. Goethe

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o estudo do processo de controle da velocidade para a moagem em moinho de bolas através da utilização de um inversor de frequência controlado pelo *hardware* Compact Fieldpoint e pelo *software* LabVIEW, com interesse em realizar o controle do processo de moagem para alcançar uma condição otimizada de operação.

Para isso, foi estudado um sistema de controle baseado na tecnologia do software LabVIEW da National Instruments. Com o sistema de controle desenvolvido foi avaliada a performance do aplicativo criado no ambiente de programação G, linguagem de programação do LabVIEW, para controle de velocidade no processo de moagem. A utilização de inversor de frequência conectado e controlado pelo Compact Fieldpoint 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 (ou força) centrífuga.

Aliado a capacidade de interface do software LabVIEW, que possibilita a visualização do processo de forma gráfica com semelhança dos painéis e controles virtuais ao sistema físico, torna a migração para um sistema de controle baseado em computadores uma boa alternativa para melhorias dos processos de fabricação, em especial o processo de moagem em moinho de bolas.

ABSTRACT

This work had the objective of study the speed control of the process of ball-milling through the use of a controlled frequency inverter (drive) connected to the Compact Fieldpoint hardware and the LabVIEW software, with the interest in carrying through the control of the milling process to reach an optimized condition of operation.

For this, a control system based on LabVIEW software technology of the National Instruments was studied, with the developed control system was evaluated the performance of the application once created in the G environment, programming language of the LabVIEW, for control the speed of the milling process. The use of frequency inverter hardwired and controlled by Compact Fieldpoint made possible generate different combinations of speeds with different conditions of fulfilling of the mill, and evaluate the milling for each of these operational conditions and determining landslide occurrence, cascade effect, and centrifugal acceleration (or force) effect points.

Ally to the interface capacity of the LabVIEW software, makes possible the virtual visualization of the process in a graphical form with panels and controls similar to the physical system, the migration to control system based on computers becomes a good alternative for processes improvements, in special the milling process in ball-milling.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Introdução	5
2.2. Análise Geral	5
2.3. Interfaces para Comunicação Homem-Máquina	5
2.4. Sistema de Automação do Processo de Vapor-Phase Axial Deposition Utilizando o LabVIEW	6
2.5. O LabVIEW no Ensino Experimental de Sistemas de Energia Elétrica	8
2.6. Utilização do LabVIEW em Centros de Pesquisa Industriais	10
2.7. O Controle de um Moinho de Bolas na Indústria	10
2.8. Moagem em Moinho de Bolas	10
3. CONCEITOS	13
3.1. Conceitos da Teoria de Controle	14
3.2. Controle, Monitoração e Automação	16
3.3. Os Controladores de Processo	19
3.4. A Arquitetura do Sistema de Controle	19
3.5. O Conceito de Otimização de Processos	19
4. METODOLOGIA	21
4.1. Introdução	22
4.2. O Controle dos Parâmetros de Processo – Controle da Velocidade de Rotação	22
4.3. Metodologia de Elaboração do Código-Fonte Baseado em Linguagem Visual G	24
4.4. Sistema de Controle e Monitoramento Através do Aplicativo Gerado com a Programação LabVIEW para Ensaio de Acionamento Remoto do Moinho de Bolas	25
5. FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS	27
5.1. O Inversor de Frequência para Controle do Motor Trifásico	28
5.2. O Moinho Cerâmico de Bolas de Escala Laboratorial	30
5.3. Construção da Mesa de Acionamento para Execução dos Ensaios de Moagem em Moinho de Bolas	31
5.4. Hardware de Controle Compact Fieldpoint	32
5.4.1. Os Módulos do Compact Fieldpoint Utilizados	35
5.5. Programas para Controle, Monitoração e Automação	39
5.5.1. O Software LabVIEW	39
5.5.2. LabVIEW Real-Time (LabVIEW RT)	40
5.5.3. LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (LabVIEW DSC)	41
6. RESULTADOS	42
6.1. Mesa de Acionamento Construído para os Ensaios de Moagem em Moinho de Bolas	43

6.2.	O Programa para Controle do Processo de Moagem em Moinho de Bolas	44
6.3.	Condições Operacionais Escolhidas para os Ensaios	48
7.	CONCLUSÕES	57
8.	PROJETOS FUTUROS	60
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	GLOSSÁRIO	66

1. INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias para alcançar resultados otimizados e gerar perspectivas de soluções é crítico para as pesquisas e aplicações em processos industriais dos mais variados tipos, indo desde a monitoração e controle de linhas de produção a simples acionamentos de motores de indução.

As Indústrias, de modo geral, têm-se beneficiado das pesquisas científicas com o aprimoramento de seus produtos e com a obtenção de melhores resultados de produção, seja pela diminuição de falhas seja pela redução de custos de produção, entre outros fatores econômicos, sociais e técnicos. E, nos atuais níveis de exigências, necessidades e crescimento da Indústria de processos, cabe aos centros de pesquisa desenvolver soluções para os problemas que permeiam o seu ambiente. [1] [2]

Resultados mais otimizados e eficientes, além da flexibilidade e da compatibilidade entre os equipamentos, são fatores de grande importância para implementações de melhorias nos processos. Uma forma de melhorar resultados é a combinação de conhecimentos, tecnologias e soluções que são implementados ao processo para alcançar o resultado final desejado. A figura 1.1 mostra o esquemático dessa combinação.

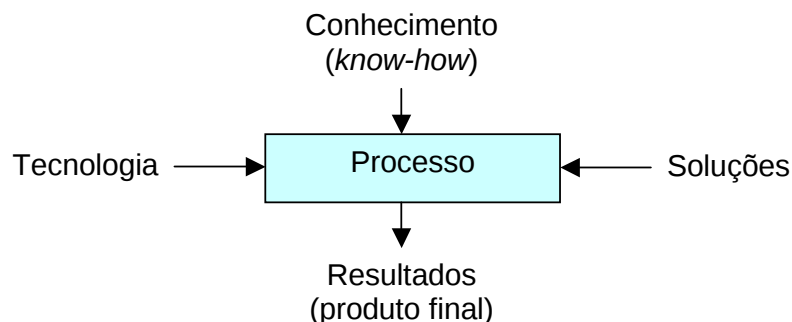


Figura 1.1 – Esquema para desenvolvimento de um produto final através de combinação de fatores.

Com os recentes avanços tecnológicos, tornaram-se disponíveis equipamentos e instrumentos mais sofisticados e mais recursivos (exemplificando: capacidade de processamento, recursos estatísticos, modelagem matemática, etc), em condições de mercado acessíveis aos vários níveis de capacidade das empresas. Com isso, é possível fazer uso de vantagens como compatibilidade, flexibilidade e capacidade, e onde sejam necessárias precisão, eficiência e soluções inteligentes para a melhoria dos processos de fabricação.

A aplicação de sistemas de controle e monitoração em processos industriais de fabricação é uma forma de utilização dessas tecnologias. Um exemplo é a aplicação do sistema de controle e monitoração no processo de moagem em moinho de bolas.

Esse é um processo largamente utilizado em indústrias cerâmicas e é fundamentado no processo de redução de partículas através do efeito mecânico, baseado em impacto e abrasão [3]. O controle do processo de moagem foi realizado através do controle de suas variáveis de processo, mais especificamente da sua velocidade de rotação, com o uso de equipamentos (*hardware*) e programas (*software*) de controle e monitoração.

O objetivo é o controle e monitoração do processo de moagem em moinho de bolas visando a melhoria de seus resultados através de um controle mais elaborado através do uso

de computadores e *hardwares* de controle. As melhorias de resultados dizem respeito à uniformidade e à qualidade de seus produtos, à redução de falhas de operação, e à otimização do processo de moagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A pesquisa, seleção e análise das publicações (livros, textos técnicos, revistas especializadas e publicações de congressos) que serviram de referência são partes importantes do estudo. Com base nessas informações foi realizado um levantamento da atual situação do tema, e explorado o assunto de interesse de forma ordenada e sistemática por meio da análise e do estudo dos métodos utilizados e dos resultados obtidos nas pesquisas realizadas.

2.2 Análise Geral

A utilização de recursos computacionais nos dias atuais tem sido uma necessidade real e presente, tanto para as pesquisas científicas, como para as operações industriais. Pesquisadores e engenheiros necessitam e se utilizam, cada vez mais, de recursos de *hardware* e *software* para atingirem resultados mais eficientes, gerando e fornecendo novas perspectivas de soluções para o controle e monitoração de processos. [1 a 25]

As tecnologias para uso em controle e monitoração de processos estão cada vez mais sofisticadas, completas e flexíveis, disponibilizando ferramentas e recursos que permitem criar sistemas especializados para as mais variadas situações e necessidades, e ajustáveis para cada condição em particular. [1 a 25]

A implementação de *hardwares* com maiores e melhores capacidades (memória, processamento e robustez), mais confiáveis e flexíveis, juntamente com a adoção de padrões de comunicação, tornou o processo de utilização de *hardware* de controle não só uma opção, mas uma ferramenta poderosa para alcançar melhores resultados. [1 a 25]

Além dos recursos de *hardware*, outro ponto interessante é o desenvolvimento de *softwares* com linguagens gráficas. Esse tipo de linguagem de programação implementa novas opções, recursos e tipos de interfaces homem-máquina (IHM). O objetivo da programação gráfica é diminuir o tempo gasto em elaboração de aplicativos, para investir mais nos processos em si, e, ainda, garantir que os aplicativos gerados por essas linguagens apresentem um resultado que supra as necessidades para as quais ele foi criado. [1 a 25]

Um ponto analisado é a aplicação do *software* de controle LabVIEW da empresa National Instruments, uma ferramenta computacional utilizada mundialmente em aplicações industriais e em pesquisas, nas áreas de engenharia, biologia, nuclear e medicina. A capacidade e a flexibilidade do sistema LabVIEW têm facilitado os trabalhos de profissionais e pesquisadores no desenvolvimento de sistemas de controle e experimentos controlados via computador. O LabVIEW tem sido usado em vários campos do Conhecimento e em centros de pesquisa nacionais e internacionais, como: Unicamp, USP, University of Washington, e University of Michigan. [1 a 25]

2.3 Interfaces para Comunicação Homem-Máquina

O desenvolvimento da produção industrial tem-se caracterizado, também, pelo crescimento da mecanização, aumento da automação, e pelas operações cada vez mais fragmentadas e mais bem organizadas hierarquicamente. Isso possibilita um controle mais detalhado, um acompanhamento do processo em vários níveis hierárquicos, e diferentes formas de visualizar o processo. [4] [5] [6] [7]

Nas Indústrias existe um número cada vez maior de operações influenciadas pelo uso dos computadores. Os efeitos que a operação humana podem causar em tais sistemas dependem da forma de interação que é utilizada em sua programação para a operação do processo. As linguagens de programação ocupam uma posição importante no desenvolvimento de interfaces homem-máquina, que é a compreensão humana de algum artifício de linguagem utilizado pela máquina para representação de algum comando, evento ou tarefa. [4] [5] [6] [7]

No desenvolvimento de sistemas de controle, o fator humano deve ser considerado como um critério de preparação do sistema de interfaceamento, pois o computador, apesar de controlar parte do processo, não decide em condições operacionais não-catalogadas. Ao computador cabe “tomar” as decisões limitadas às especificações ou dados contidos em sua programação. [4] [5] [6] [7]

Os critérios utilizados atualmente no desenvolvimento de interfaces homem-máquina operacionais passam por detalhes de operação e ajustes para se adaptarem e garantirem a ergonomia do operador “humano”. Muitas vezes, esses critérios somente são considerados depois que ocorrem, de forma bastante óbvia, os pontos de desvantagens e desconforto das operações. Em vez de ser um desenvolvimento simultâneo e adaptativo às necessidades do operador, a interface homem-máquina passa a ser um fator de segundo plano. [4] [5] [6] [7]

O indicado é o desenvolvimento das tecnologias baseadas tanto nas necessidades “humanas” como nas necessidades do processo. Isso se traduz na capacidade que as tecnologias têm de ser flexíveis e ajustáveis às necessidades humanas e ao processo, para a realização de alguma operação, evento ou tarefa. [4] [5] [6] [7]

2.4 Sistema de Automação do Processo de Vapor-Phase Axial Deposition Utilizando o LabVIEW

O LabVIEW é utilizado na Unicamp para automatizar o processo de VAD (*Vapor-phase Axial Deposition*) e substituir o controle manual. O sistema de controle desenvolvido tem como função monitorar o processo e detectar e controlar o diâmetro da pré-forma por meio de um sistema retroalimentado, montado na linguagem de programação LabVIEW, como mostrado na figura 2.1. [8]

A automação do processo de VAD para controle da uniformidade geométrica de pré-formas para fibras ópticas utilizando o LabVIEW foi motivada pela necessidade de se ter um produto mais elaborado, com qualidade superior e com um controle de resultados mais eficiente. [8]

Com a utilização de sensores e transdutores interligados ao aplicativo é possível realizar ajustes de acordo com o valor que for detectado e comparado com a referência (resultado desejado). Isso permite o acompanhamento mais detalhado das operações, assim como a verificação mais interligada do processo, que pode ser corrigido ou ajustado de forma rápida e específica, baseado no que foi adquirido pelo sistema de aquisição de dados e analisado pelo aplicativo. [8]

Com a implementação do controle, foram gerados resultados dentro das especificações necessárias, com menos problemas e falhas. A utilização de uma solução eficiente e controlada via computador implementou uma forma de visualização do processo através dos painéis gerados em LabVIEW. Nesta publicação foram relatados resultados positivos da

automação do processo de VAD, com precisão acima da precisão do processo manual, e com qualidade e controle mais eficientes, cujos resultados são mostrados na figura 2.2. [8]



Figura 2.1 – “Desktop” com imagem da pré-forma e janelas de controle. [8]

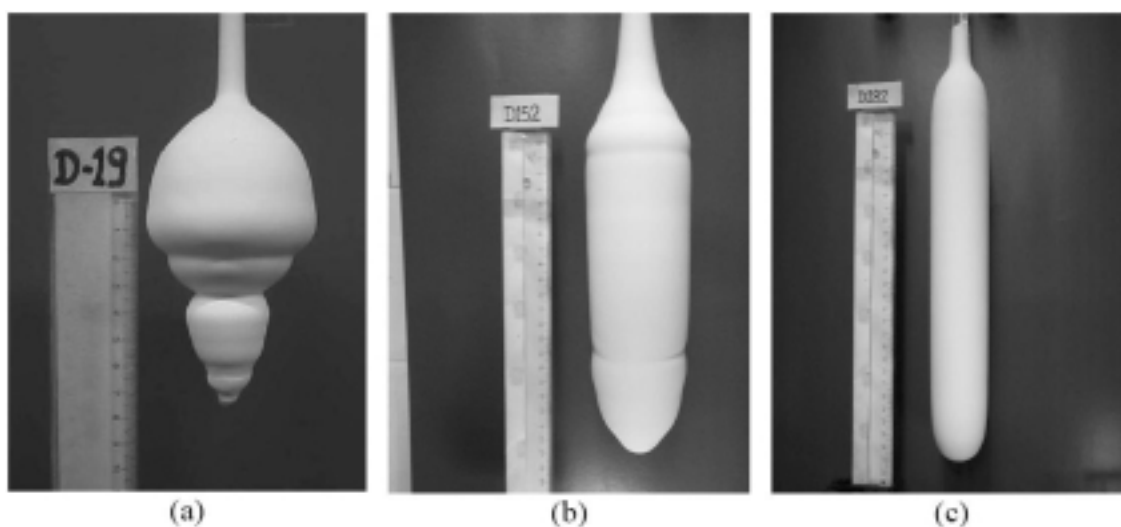


Figura 2.2 – Figura mostrando os diferentes resultados obtidos: (a) Deposição sem controle; (b) Deposição com controle manual; (c) Deposição com controle automatizado. [8]

2.5 O LabVIEW no Ensino Experimental de Sistemas de Energia Elétrica

O Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP teve interesse na didática do sistema LabVIEW, o qual tem sido utilizado no laboratório de ensino e elaboração de experimentos acadêmicos do curso de Engenharia Elétrica, porque possibilita montar uma bancada de ensaios com flexibilidade e recursos para execução dos experimentos, aquisição de dados e tratamento de sinais de grandezas elétricas para análises e trabalhos dos alunos do curso. Foi montada uma bancada de teste para aquisição de dados via computador, através de *hardwares* de aquisição de dados e do *software* LabVIEW, como mostra o esquema, na figura 2.3. [9]

O foco desta montagem foi a didática para os alunos de engenharia elétrica, que teriam à disposição uma bancada de ensaios bastante adequada às suas necessidades. Com tal bancada é possível realizar o controle e a monitoração de um mini-sistema, acompanhando a aquisição e o tratamento de sinais elétricos; tudo feito de forma compreensível e didática. A imagem da bancada é mostrada na figura 2.4. [9]

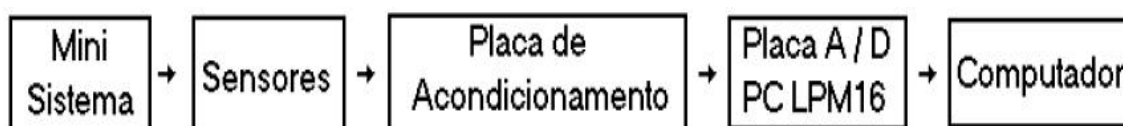


Figura 2.3 – Esquemático do sistema de aquisição e tratamento de sinais desenvolvido. [9]



Figura 2.4 – Foto do sistema completo com sensores, placa de condicionamento de sinais e micro PC com placa A/D. [9]

Foram criadas interfaces, geradas em LabVIEW, para acompanhamento dos ensaios com recursos visuais de um conjunto de grandezas elétricas para estudo e visualização do minissistema. Algumas dessas interface são mostradas nas figuras 2.5 e 2.6. [9]

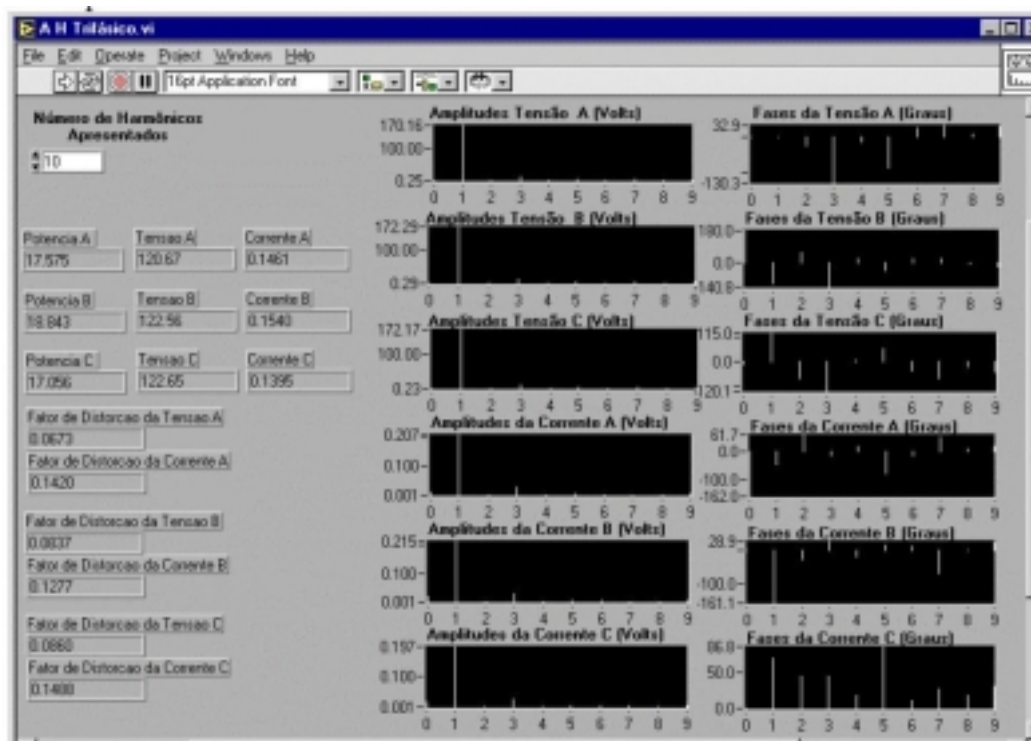


Figura 2.5 – VI (Virtual Instrument) com os resultados de medição e cálculo de potências em sistemas não-senoidais com análise harmônica. [9]

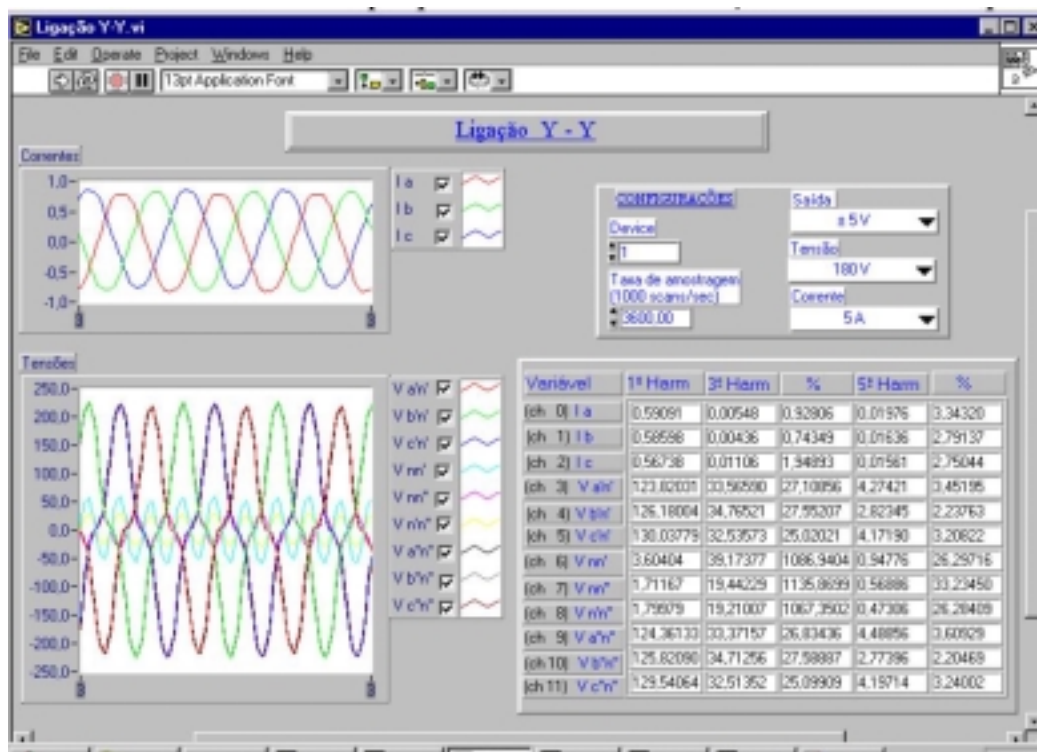


Figura 2.6 – Tela de interface com resultados de uma aquisição de dados para um banco de transformadores com 2 enrolamentos em ligação Y/Y. [9]

2.6 Utilização do LabVIEW em Centros de Pesquisa Industriais

O LabVIEW tem sido utilizado em aplicações bem características, nos mais variados campos de pesquisa e desenvolvimento; um exemplo típico é o uso do LabVIEW e do *hardware* da National Instruments em pesquisas realizadas pela NASA em seus astronautas. Utilizando o LabVIEW, algumas placas de aquisição de dados e alguns instrumentos conectados aos astronautas, a NASA estuda a influência da gravidade zero na permanência dos astronautas no espaço. [1]

Outro uso do LabVIEW é nas pesquisas da indústria Haley-Davidson, para aquisição de dados dos experimentos que simulam as condições operacionais das peças. Com o LabVIEW são feitas aquisições e tratamentos das informações geradas nas simulações, para a análise e avaliação do comportamento das peças em algumas condições especiais definidas pela empresa. Os resultados são utilizados para avaliação do processo de teste das peças. São avaliados fatores como temperatura, força, voltagem, corrente, etc. [2]

2.7 O Controle de um Moinho de Bolas na Indústria

Um sistema de controle foi utilizado para otimizar os circuitos de moagem de minério de ferro na Companhia Vale do Rio Doce. Foi feita a análise do controle atual do processo e apresentadas novas técnicas de controle baseadas em recursos mais sofisticados (inteligência artificial, algoritmos avançados, modelagem do processo). [10]

A análise do sistema de controle convencional é realizada visualizando-se suas deficiências e, em seguida, é apresentada uma solução de controle que utiliza recursos mais apropriados para o processo. Como o processamento de minerais é complexo, por possuir um grande número de variáveis não-lineares, a implementação de um sistema de controle que otimize o processo representa uma grande vantagem de qualidade e de custo. Com a implantação de um sistema de controle adequado, a otimização gera estabilização do processo, controle de qualidade mais eficiente, e, conseqüentemente, aumento da lucratividade. [10]

2.8 Moagem em Moinho de Bolas

A moagem em moinho de bolas é largamente utilizada em indústrias cerâmicas para obtenção de matéria-prima com uma condição granulométrica adequada, ou seja, a moagem é um processo mecânico baseado em impacto e abrasão para a redução do tamanho das partículas.

O processo de moagem em moinho de bolas é muito complicado devido ao número de parâmetros não-lineares que afetam sua operação, fato que o torna alvo de vários estudos para entendimento dos fenômenos que ocorrem durante seu funcionamento. Parâmetros físicos como diâmetro e comprimento do cilindro de moagem, volume de carga e distribuição de esferas; parâmetros de controle como alimentação e rotação; parâmetros do material como granulometria, módulo de Young e tensão, afetam o processo de moagem tornando-o complexo e característico. A combinação desses parâmetros permite a ocorrência de efeitos como deslizamento, cascata ou catarata e força centrífuga do processo de moagem. [11] [12]

O comportamento das esferas utilizadas no processo de moagem tem características específicas que dependem do material a ser moído, das reações químicas entre o material a ser moído e os componentes do moinho de bolas, da velocidade e da taxa de preenchimento do moinho. A combinação de todas essas variáveis que afetam o processo é de grande

complexidade e alvo de vários estudos. Para cada tipo de material existe uma condição adequada para moagem, que vai desde velocidade de rotação do moinho ao tipo de esfera utilizada para moagem. A concordância e combinação entre esses parâmetros é que oferece um processo de moagem mais eficiente. Um dos parâmetros mais estudados para o controle do processo de moagem é a velocidade de rotação. Isso se deve à facilidade da tecnologia atual na realização do controle desta variável com precisão e flexibilidade. [12]

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, dessa 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 fraturadas dependem da intensidade do impacto, que pode ser descrita como força do impacto ou energia cinética do impacto, e em alguns casos, a moagem pode ocorrer por fenômeno de abrasão. A figura 2.7 ilustra os estágios da moagem de acordo com a velocidade de rotação, variando de velocidades baixas (deslizamento) até as mais elevadas (força centrífuga). [3]

A maximização desses impactos ocorre com o efeito denominado “cascata” ou “catarata”, mostrado na figura 2.7, onde as esferas e o material se movimentam até alcançarem uma determinada altura do moinho e tombarem, esmagando o material que se encontra na parte inferior do cilindro. [3]

Para se alcançar a condição em que o efeito de moagem seja adequado é fundamental ter um controle preciso da velocidade de rotação. Tendo isso em foco, determinar a velocidade passa a ser uma prioridade para a realização do processo de moagem de forma otimizada e eficiente, maximizando assim os efeitos anteriormente descritos.

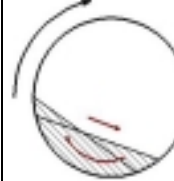
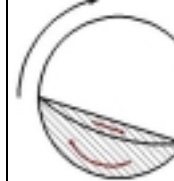
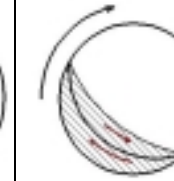
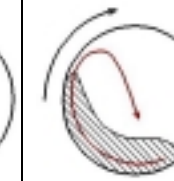
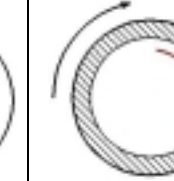
Forma Básica	Movimento de Deslizamento		Movimento de Cascata			Movimento de Catarata	
Subtipo	Deslizar	Precipitar	Escorregar	Rolar	Cascata	Catarata	Centrífuga
Esquemático							
Processo Físico	Deslizando		Misturando			Esmagando	Centrífuga

Figura 2.7 - 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 a direita.

3. CONCEITOS

3. CONCEITOS

3.1 Conceitos da Teoria de Controle

Para a análise dos sistemas de controle foram utilizadas conceituações e metodologias da teoria de controle para implementação no processo de moagem em moinho de bolas.

A teoria de controle tem como enfoque principal os sistemas, ou seja, um conjunto de comandos ou informações conectados e interligados para realizar o controle de alguma operação. O controle tem desempenhado um papel muito importante no desenvolvimento tecnológico, porque pode ser aplicado em soluções desde as mais simples, como o controle de um sistema com uma única variável sem interferências, exemplificado na figura 3.1, até as mais complexas, como o controle de um sistema de um veículo espacial. Em vista dos últimos acontecimentos, a teoria de controle tem sido aplicada nos atuais processos industriais e manufaturas modernas. [26]

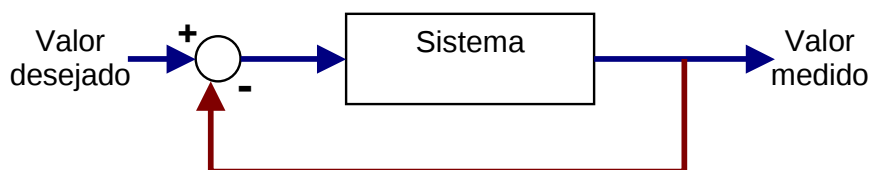


Figura 3.1 – Modelagem de um Sistema de controle baseado na teoria de controle.

Os conceitos utilizados na teoria de controle são abrangentes e independentes de aplicações específicas, podendo ser utilizados em campos do conhecimento além da engenharia; como exemplo, os sistemas biológicos, econômicos e biomédicos. [26]

O conceito de sistema tem o sentido de delimitar uma situação, processo ou estado, ou seja, um sistema tem um conceito arbitrário e abstrato, mas que delimita com exatidão o ambiente ou objeto a ser estudado. Com a análise do comportamento do sistema de forma a entender o funcionamento e as características particulares, pode-se analisar como influenciar o sistema e montar estratégias para implementar essas influências a fim de alcançar um objetivo ou estado desejado. A figura 3.2 mostra esquematicamente essas análises. [26] [27]

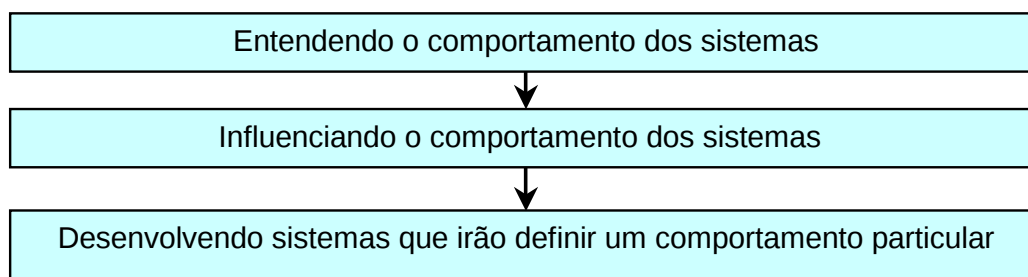


Figura 3.2 - Sequência de objetivos de um projeto de controle típico [27]

Para a caracterização adequada de um sistema deve-se ter em mente a estrutura a ser aplicada, se mais simples ou mais complexa, dependendo do que se planeja executar ou implementar. A visualização do sistema torna-se um ponto de grande importância como primeiro passo para construção de um modelo de controle a ser implementado com algumas

características e forma de interação, como mostra a figura 3.3, e, a partir dessa primeira definição mais geral, inicia-se o processo de caracterização do sistema, acrescentando detalhes, modelos, funções e características que o definam da forma mais próxima possível da realidade.

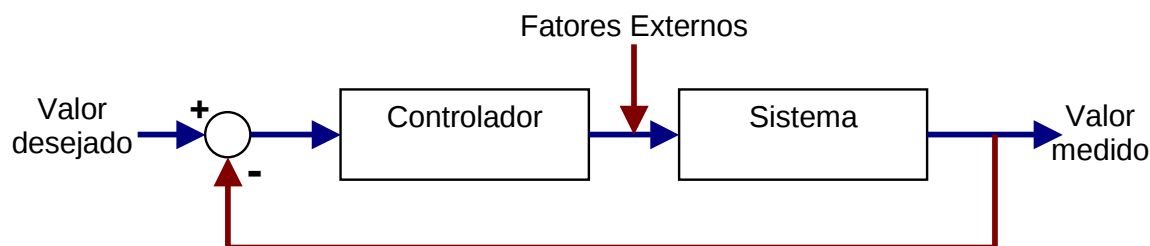


Figura 3.3 – Sistema de controle baseado em conceitos da teoria de controle com os fatores externos e controladores levados em consideração.

Para análise da teoria de controle de um sistema, devem-se avaliar os seguintes itens:

- ✦ O objetivo ou estado que se planeja alcançar, definido de forma bastante clara. Esse tipo de observação ou cuidado evita que haja perda ou desvio do objetivo traçado. Uma escolha de objetivos não-adequados ou pouco definidos acrescenta dificuldade à elaboração do sistema a ser gerado. As figuras 3.4 e 3.5 ilustram esses pensamentos;
- ✦ O conjunto de escolhas possíveis. Com a definição de forma concisa e clara do objetivo, passa-se a definir e selecionar as ferramentas e métodos que estão disponíveis para se alcançar os objetivos propostos no modelo anterior. As figuras 3.4 e 3.5 ilustram esses pensamentos;
- ✦ As ações adequadas para se atingir a condição desejada. Com os objetivos definidos e as ferramentas e métodos selecionados, prepara-se a fase de análise da forma adequada e eficiente para se alcançar os objetivos, diante do que se encontra disponível e adaptável às necessidades e limitações do que se define como sistema. As figuras 3.4 e 3.5 ilustram esses pensamentos.

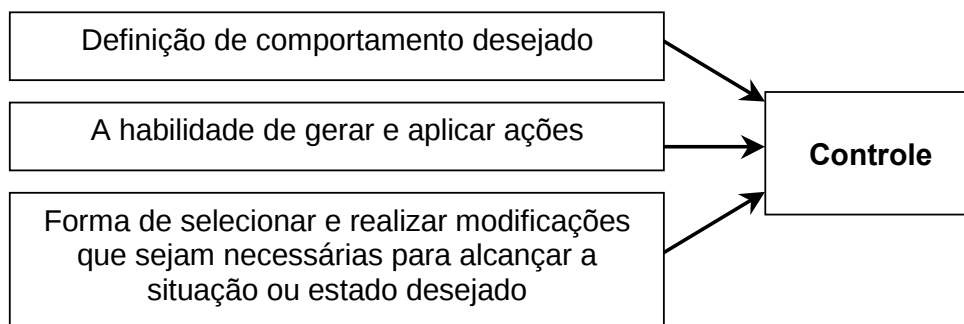


Figura 3.4 – Fatores avaliados para implementar a teoria de controle. [27]

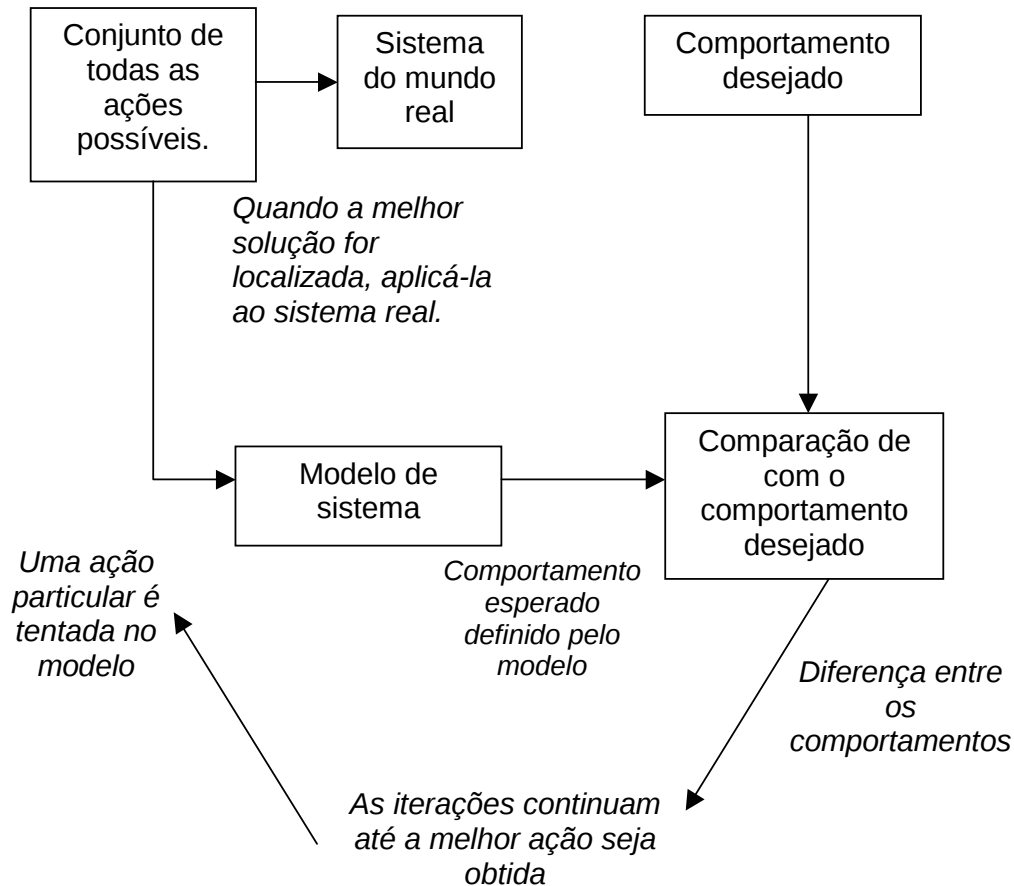


Figura 3.5 – Possível metodologia para “design” de um sistema de controle [27]

3.2 Controle, Monitoração e Automação

Uma forma de implementação, ou solução, para os desafios tecnológicos atuais foi proposta através da utilização de recursos computacionais e matemáticos para criação de sistemas de controle e monitoração ou, mais especificamente: automação de processos. A definição de automação data da segunda metade do Século 20, enfatizando a participação do computador no controle automático do processo industrial. [28]

Automação é a tecnologia que pode ser introduzida neste ambiente de desenvolvimento do controle e monitoração do processo, envolve novas metodologias e técnicas de produção, e lida com aplicações de mecânica, eletrônica, mecatrônica e computação para produção de bens e serviços. A automação se aplica a sistemas apoiados por computadores que substituem o trabalho humano e que visem soluções rápidas e econômicas em trabalhos complexos e de altas repetições.

A definição de automação tem-se expandido e ramificado para vários setores como uma forma mais otimizada de alcançar resultados. Automação industrial, por exemplo, ocorre com a implementação de sistemas mecânicos e eletrônicos aliados ao controle e auxiliado por computadores nas linhas de produção. É a utilização de máquinas que possam otimizar a produção ou mesmo substituir atividades repetitivas do processo, poupando o “homem” de tarefas não-adequadas, e dando ao mesmo o trabalho de gerenciar e supervisionar o processo.

Existem muitas vantagens em automatizar (controlar e monitorar) um processo, algumas delas são enumeradas abaixo [29]:

- ⊕ Redução dos custos de produção:
 - ⊕ diminuição do número de operários em contato com a produção;
 - ⊕ aumento da quantidade de um dado produto em um dado período;
 - ⊕ melhor utilização da matéria-prima;
 - ⊕ economia de energia.
- ⊕ Melhoria das condições de trabalho do ser humano:
 - ⊕ eliminação de atividades perigosas ou insalubres de seu contato direto.
- ⊕ Melhoria da qualidade do produto:
 - ⊕ controle mais racional dos parâmetros de produção, o processo passa a ser mais eficiente e otimizado.
- ⊕ O processo alcança uma flexibilidade que facilita mudanças e variações mais simples e rápidas.
- ⊕ O controle do processo é melhorado:
 - ⊕ reduzem-se as perdas e as falhas;
 - ⊕ realização de atividades impossíveis de serem controladas manualmente ou intelectualmente;
 - ⊕ pelas características dos equipamentos, é possível alcançar maiores velocidades de processo.

Neste ambiente de automação, pode-se fazer referência aos tipos de automação mais usuais [27]:

⊕ **Automação fixa**

Refere-se ao uso de equipamentos dedicados e direcionados a um tipo específico de operação, baseado em uma lógica automática de seqüência fixa. Esse tipo de sistema é associado com altas taxas de produção e é relativamente difícil de se acomodar a mudanças de características dos produtos. A automação fixa data da 1ª Guerra Mundial, quando as primeiras linhas de produção foram utilizadas. A utilização desse tipo de produção só faz sentido quando o *design* do produto é estável e o tempo de vida é longo. Isso geralmente está incorporado a altos valores de investimento e relativa inflexibilidade. Um comparativo dessas características é apresentado na tabela 3.1 e na figura 3.6;

⊕ **Automação programada**

Refere-se ao equipamento desenvolvido para acomodar uma classe específica de mudanças no produto. O processo ou linha de montagem pode ser modificado por meio de mudanças no programa de controle. É particularmente interessante para a produção em lotes médios, como mostrado na tabela 3.1 e na figura 3.6;

⊕ **Automação flexível**

Refere-se ao equipamento desenvolvido para produzir variados tipos de produto em períodos bem curtos e com uma rápida troca de produtos a serem produzidos. Com esse tipo de manufatura flexível é possível atingir uma grande variedade e combinações de produtos, e implementar modificações rapidamente, de forma a adequar a produção às

necessidades finais. Um comparativo dessas características é apresentado na tabela 3.1 e na figura 3.6.

Tabela 3.1 – Tabela comparativa entre os tipos de automação. [27]

Automação	Considerações	Vantagens	Desvantagens
Fixa	Alta demanda; Produto com longo ciclo de vida.	Eficiência máxima; Baixo custo por unidade.	Grande investimento inicial; Inflexibilidade
Programável	Produção de grupos; Produtos com diferentes opções.	Flexibilidade de lidar com mudanças no produto; Baixo custo por peça para grandes grupos.	Novos produtos; Requer muito tempo de preparação (<i>set-up</i>); Alto custo por peça em referência à automação fixa.
Flexível	Baixas taxas de produção; Variações de demanda; Produtos com curtos ciclos de vida.	Flexibilidade de lidar com mudanças de <i>design</i> do produto; Produtos customizáveis.	Grande investimento inicial; Alto custo por peças em referência aos outros tipos de automação.

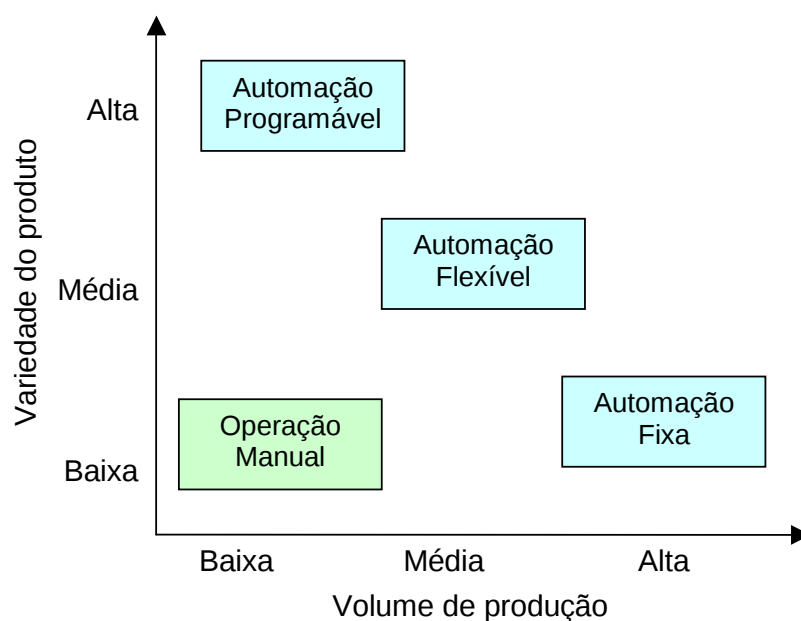


Figura 3.6 – Gráfico comparativo entre os tipos de automação. [27] [30]

Os vários ramos da automação têm em comum os mesmos princípios de controle, utilizam *softwares* e *hardwares* de controle acoplados a processos, variando apenas características mais específicas para cada situação, mas que mantêm uma conceituação similar.

3.3 Os Controladores de Processo

Um termo que se relaciona intrinsecamente com a automação é o conceito de computador ou controlador de processo, que seria o responsável pelo controle e monitoração das operações baseado em programações, algoritmos ou históricos, em resposta a eventos e condições geradas em seu processo. As características dos controladores são:

- ⊕ coletam as informações mais importantes para serem processadas pelo sistema;
- ⊕ sintetizam leis de controle ótimo para alcançar uma melhor condição de operação do processo;
- ⊕ simulam desempenhos operacionais;
- ⊕ implantam as sofisticadas leis de operação em “tempo-real”;
- ⊕ implementam sistemas de controle e segurança;
- ⊕ interfaceamento Homem-Máquina com o usuário.

3.4 A Arquitetura do Sistema de Controle

Um sistema de controle pode ser construído com base em um tipo de arquitetura bastante difundida; um sistema em forma de pirâmide, com níveis que vão desde o gerenciamento até os equipamentos que realizam as operações na área de produção. Esse tipo de visualização permite uma avaliação mais geral do sistema, em etapas operacionais, mostradas na figura 3.7.

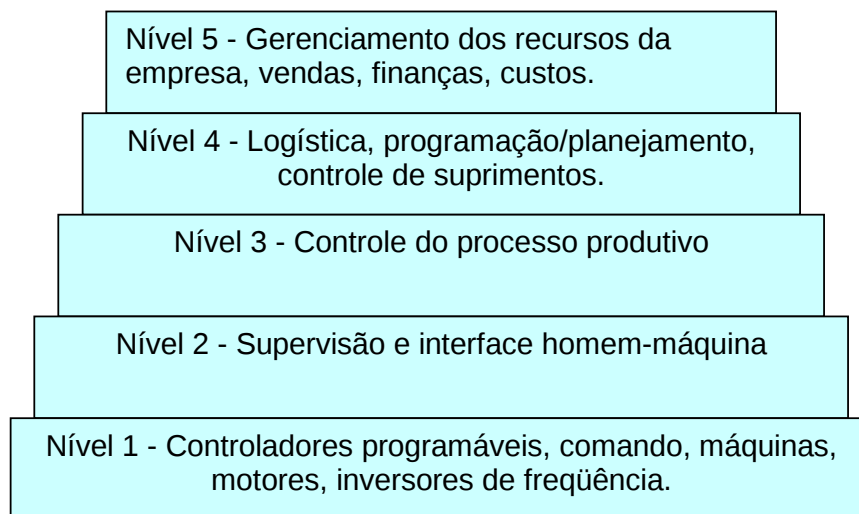


Figura 3.7 – Pirâmide da Automação. [28]

A automação para ser eficiente tem que apresentar uma idéia adotada por toda a empresa, desde os níveis mais altos, como a gerência, até o nível mais operacional da fábrica, operadores e equipamentos. Isso se deve à necessidade de uma operação conjunta de todas as partes para que tudo corra da melhor forma possível, interligando todo o sistema, a fim de se aproveitar os benefícios do controle e a monitoração do processo ou automação.

3.5 O Conceito de Otimização de Processos

A otimização é definida como a aplicação da melhor solução possível para um determinado problema, formalmente conhecida como solução otimizada. O termo otimização é freqüentemente utilizado de forma muito abrangente e aberta, mas na teoria de controle seu

significado tem uma definição mais precisa: a ação de localizar a melhor solução possível com base no que foi definido por um critério ambíguo (ou em função de custos). [27]

A otimização do processo pode ser alcançada de diferentes formas, por diferentes critérios ou soluções estimadas em função da resolução de um problema específico. O termo otimização tem adquirido a reputação de ser um termo fora da realidade, em razão da freqüente metodologia utilizada para solução dos problemas, que termina sendo muito modificada para gerar uma solução adequada. Uma forma de desenvolver soluções para problemas complexos tem sido o uso de critérios mais vagos, mas que representam melhor a realidade, ou termos mais realistas, do que simplesmente forçar uma solução a fim de obter uma rigorosa e forçosa solução do problema. [27]

4. METODOLOGIA

4. METODOLOGIA

4.1 Introdução

O controle do processo tem como primeiro passo a análise do processo em si, de forma que sejam avaliadas a necessidade, a possibilidade, a viabilidade operacional, e a garantia de melhores resultados. Observa-se, ainda, a relação de prioridades e flexibilidade de cada parâmetro, de forma que seja possível a flexibilização dos ensaios, adaptando, assim, as necessidades à disponibilização dos recursos.

Definida a utilização do controle como o fator motivado pela necessidade de se atingir resultados com melhores uniformidade e homogeneidade do produto final e a otimização do processo, iniciou-se a análise da disponibilidade dos recursos tecnológicos e a definição dos parâmetros de processos a serem controlados.

A primeira etapa do processo de controle de moagem em moinho de bolas foi iniciada com a definição de um esquema do sistema de controle, mostrado na figura 4.1.

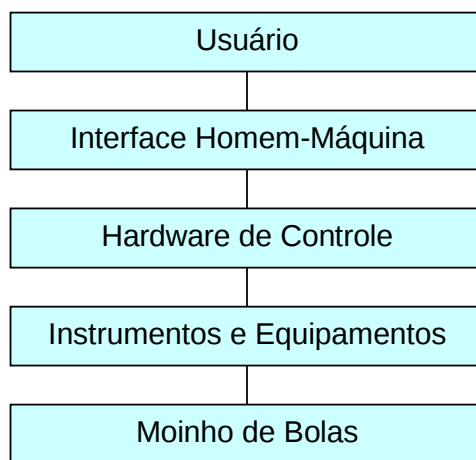


Figura 4.1 - Esquema geral do sistema de controle do moinho de bolas

4.2 O Controle dos Parâmetros de Processo – Controle da Velocidade de Rotação

O controle da velocidade de rotação do moinho de bolas por meio do controle do fornecimento de energia tornou-se a solução mais simples e mais flexível, pois as tecnologias de controle de velocidade de motores trifásicos apresentam um grau de sofisticação bastante complexo e simples ao mesmo tempo, isto é, apesar de se operar de forma bastante sofisticada para realização do controle do motor, utilizando modelos matemáticos e recursos computacionais mais sofisticados, a utilização do inversor de frequência para controle do motor trifásico torna-se mais simples, porque as modificações de operação do motor são feitas rapidamente, sem haver necessidade de modificações nos equipamentos.

O controle de velocidade do moinho de bolas foi realizado através de uma abordagem definida após análise das referências bibliográficas, bem como da disponibilidade e facilidade de migração dos recursos tecnológicos para outro processo. Isso se traduz como a elaboração de um sistema de controle menos estagnado em termos de limitações de fabricantes de equipamentos, porque utiliza recursos de controle simples, e, de certa forma, mais flexíveis, assim como o sistema de programação, código-fonte, mais simplificado e adaptável às

necessidades de cada processo de controle de velocidade feito por meio da combinação motor trifásico-inversor de frequência-Compact Fieldpoint.

O processo de interligar o inversor de frequência ao *hardware* de controle, Compact Fieldpoint, foi feito através da placa de comandos XC1 do inversor de frequência, que disponibiliza portas de entrada para sinais digitais e analógicos. Para esse caso, foram utilizadas portas digitais em forma de acionamento via relés de comandos e uma porta analógica com limites de potência para sinais de voltagem de 0 ~ 10 volts.

A unidade de processamento, cFP-2020, do Compact Fieldpoint opera de duas formas: como um meio intermediário ou como operação isolada. No primeiro caso, o Compact Fieldpoint opera como um meio intermediário para o controle do inversor de frequência, funcionando com um meio de aquisição e transmissão de dados entre o computador e o inversor, sem haver a etapa de processamento das informações, cabendo as decisões ao computador de controle, no caso o PC.

Para o segundo caso, a forma de operação isolada, o processo passa a ser controlado, de forma que o processamento das informações é realizado no processador do Compact Fieldpoint, cFP-2020. Para esse tipo de operação existe a necessidade de um sistema operacional que garanta a estabilidade e confiabilidade das operações; no caso, foi utilizado o sistema operacional LabVIEW Real-time, ou simplesmente LabVIEW RT, um sistema operacional dedicado que evita perda de leituras, de transmissões, ou perda de sinais, que, dependendo do caso, pode gerar um colapso do sistema de controle.

O diagrama abaixo, figura 4.2, mostra como foi feita a disposição dos equipamentos para execução do experimento para os dois modos de operação:

- ⊕ IHM (painel e display) instalada no inversor de frequência e alterada manualmente;
- ⊕ acesso remoto com LabVIEW e Compact Fieldpoint, através do protocolo Ethernet para controle e monitoração via computador com o programa LabVIEW.

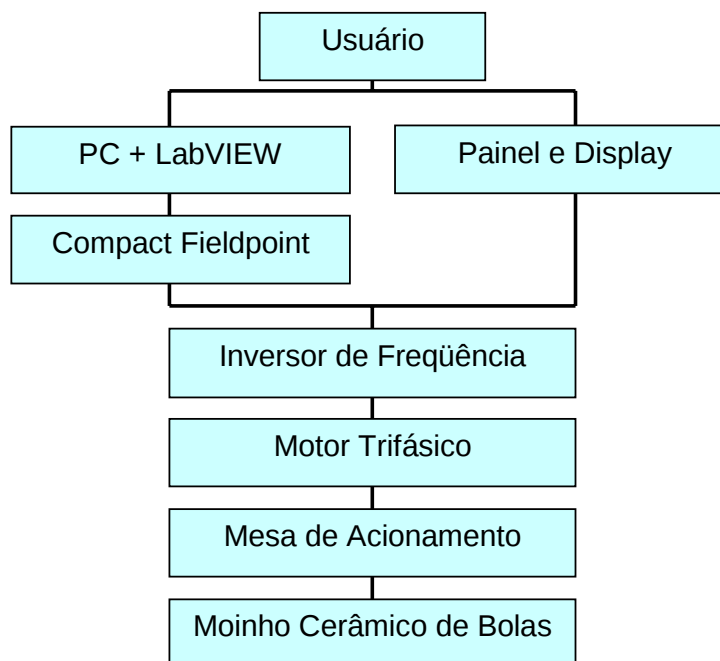


Figura 4.2 - Diagrama de blocos dos equipamentos para o ensaio do moinho de bolas.

O sistema de controle final ficou com a configuração mostrada na figura 4.3, cujo controle de velocidade é feito através do conjunto Compact Fieldpoint-Inversor de Frequência.

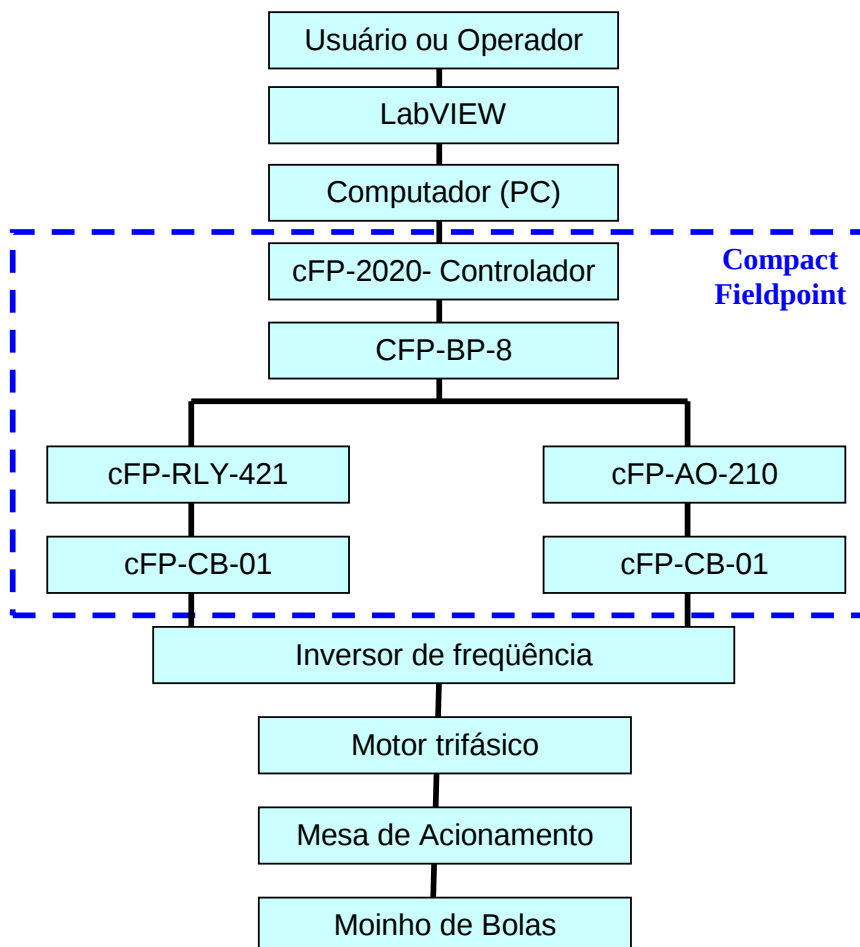


Figura 4.3 – Sistema de controle do moinho de bolas utilizando o hardware de controle Compact Fieldpoint.

- ⊕ A magnitude da velocidade é controlada pelo componente cFP-AO-210,
- ⊕ A partida e a parada do motor são realizadas pelo componente cFP-RLY-421;
- ⊕ A mudança de sentido de rotação é feita pelo componente cFP-RLY-421.

4.3 Metodologia de Elaboração do Código Fonte Baseado em Linguagem Visual G

O Software LabVIEW utiliza a linguagem virtual G como linguagem de programação. O processo de programação dessa linguagem segue uma lógica baseada em duas formas de visualização programadas paralelamente. A figura 4.5 mostra esquematicamente essas visualizações.

Uma das formas de visualização da programação (lado direito em azul da figura 4.5) é a etapa referente ao usuário ou operador do processo. É mostrado um painel ou display para interface homem-máquina de maneira análoga ao instrumento real. Isso foi feito de forma intencional, a fim de que a migração de uma instrumentação real para uma instrumentação

virtual fosse realizada de forma gradativa, e que o usuário fosse adquirindo familiaridade para com essa nova forma de interagir com o sistema. Para a construção do painel para interface homem-máquina, o LabVIEW disponibiliza gráficos, painéis numéricos, alarmes, botões, entre outros recursos.

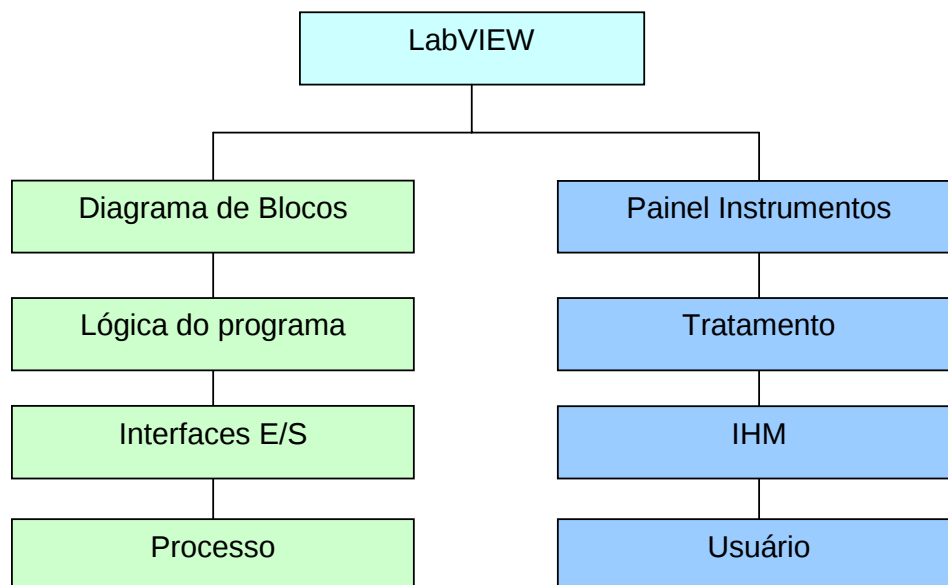


Figura 4.5 – Esquema de divisão de visualização da programação em LabVIEW

A segunda forma de visualização da programação (lado esquerdo em verde da figura 4.5) é baseada em diagramas de fluxo, onde está organizada e estruturada toda a parte lógica da programação. Enquanto na primeira visualização o enfoque é a interface com o usuário, essa segunda opção é para a estruturação de toda a parte lógica da programação: comparadores, relógios, booleanos, recursos estatísticos e matemáticos, entre outros recursos que são disponibilizados para utilização na elaboração de código e lógica do programa.

Baseado nessas duas formas de programação complementares e distintas, que se encaixam e interagem entre si, é possível gerar aplicativos bastante elaborados de forma relativamente rápida. Existe a disponibilidade de recursos como PID e Matrizes associados a recursos matemáticos e estatísticos, que tornam esse programa uma ferramenta eficiente e adequada para realização da programação e utilização de recursos computacionais de forma rápida, recursiva e visualmente elaborada.

O LabVIEW tem complementos divididos em módulos que completam sua versão principal, esses módulos acrescentam recursos específicos para aplicações. São exemplos: o LabVIEW *Real-Time* (RT) e o LabVIEW *Datalogging and Supervisory Control* (DSC).

4.4 Sistema de Controle e Monitoramento Através do Aplicativo Gerado com a Programação LabVIEW para Ensaio de Acionamento Remoto do Moinho de Bolas

O ensaio de controle e monitoração do processo de moagem em moinho de bolas foi realizado em uma situação laboratorial, a operação foi realizada com uma seqüência de fatores de preenchimentos e velocidades estimadas baseado nas referências analisadas e nos experimentos iniciais. Para o ensaio de controle e monitoração do processo foi estudado o comportamento do moinho sem o material a ser moído, estando presente apenas as esferas (bolas).

O sistema de controle e os equipamentos do processo de moagem montado no laboratório para o ensaio, mostrado abaixo e na figura 4.4, é composto de:

- ⊕ moinho de bolas
- ⊕ mesa para acionamento do moinho de bolas
- ⊕ motor trifásico
- ⊕ inversor de frequência
- ⊕ hardware Compact Fieldpoint
- ⊕ PC com LabVIEW instalado

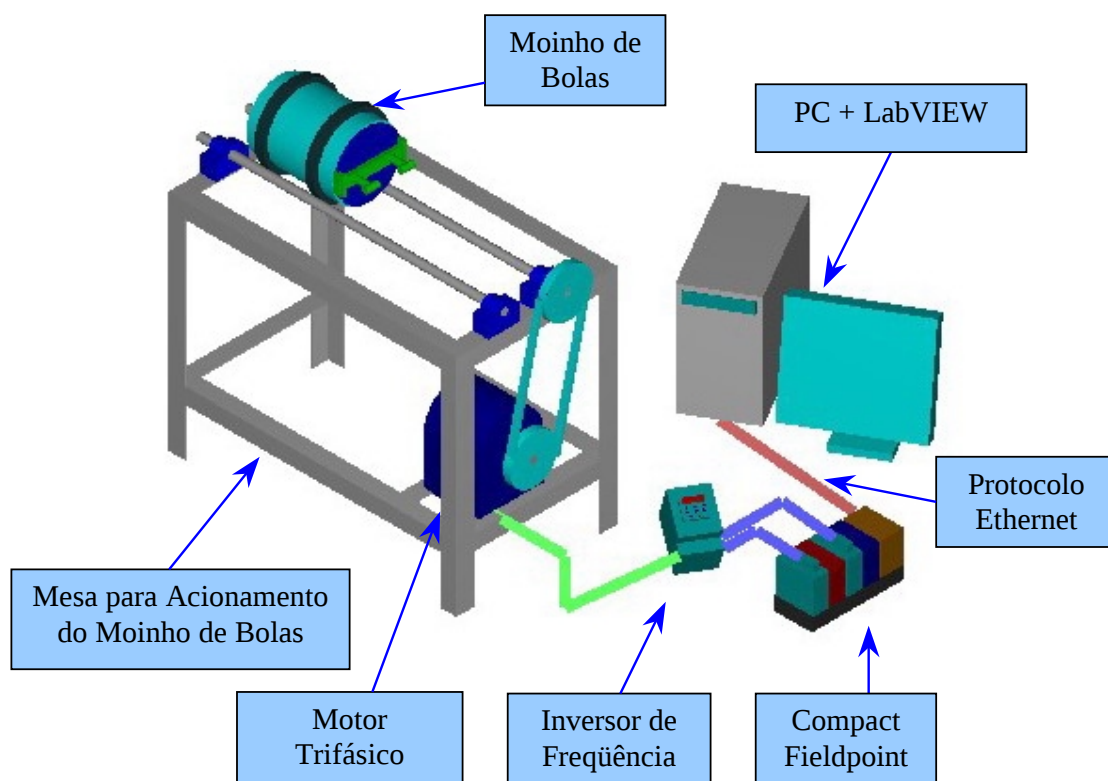


Figura 4.4 – Esquema da composição física do sistema de controle e monitoração do processo de moagem em moinho de bolas.

5. FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS

5. FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS

5.1 O Inversor de Frequência para Controle do Motor Trifásico

O inversor de frequência, também conhecido como conversor de frequência, 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 mediante mudanças nos parâmetros de fornecimento de energia para o motor trifásico, como mostra esquematicamente a figura 5.1, o que torna possível obter o controle flexível do motor trifásico. O controle do inversor de frequência pode ser feito por comandos elétricos, teclado ou protocolos de transmissão, como mostrado na figura 5.1.

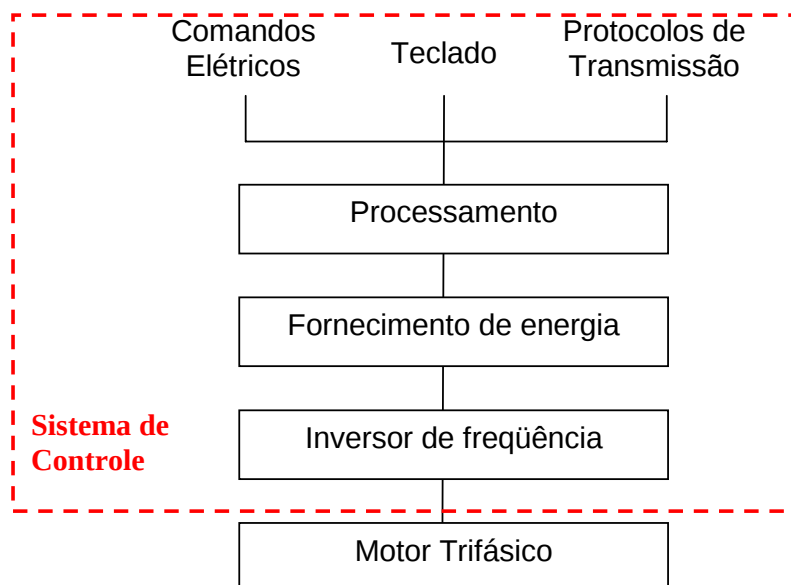


Figura 5.1 – Sistema utilizado pelo inversor de frequência para controle do motor trifásico.

Os métodos industriais mais utilizados são baseados em metodologias de controle do tipo escalar ou vetorial. Para o caso vetorial em especial, sua precisão é dependente da utilização de algoritmos complexos, baseados em modelos matemáticos de motores elétricos. Com esta metodologia é possível obter resultados de operação de motores 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 de motores trifásicos pudesse ser otimizado para utilização. [31]

Com o advento dos inversores de frequência é 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. Existem vários métodos de controle que podem ser utilizados: teclado, comandos elétricos ou protocolos de transmissão. Há recursos variados para realização do controle do inversor de frequência desde soluções mais simples até as mais complexas.

O modelo do inversor de frequência utilizado foi o modelo CFW-08 *Vector Inverter* da empresa WEG, Brasil. O CFW-08 possui o controle do tipo escalar (V/F) e um controle do tipo vetorial *sensorless* (VVC: Voltage Vector Control). A operação em modo vetorial é recomendada para operações em que a otimização seja em função do melhor desempenho de

torque e da regulação de velocidade, e o modo escalar é recomendado para operações mais simples como acionamento de bombas e ventiladores. A figura 5.2 mostra o desenho do inversor de frequência CFW-08, caracterizando suas interfaces de entrada e saída: Controle XC1, Potência e Aterramento. A figura 5.3 mostra em detalhes as portas de comandos de controle XC1 que foram utilizadas para o controle do inversor de frequência. [32]

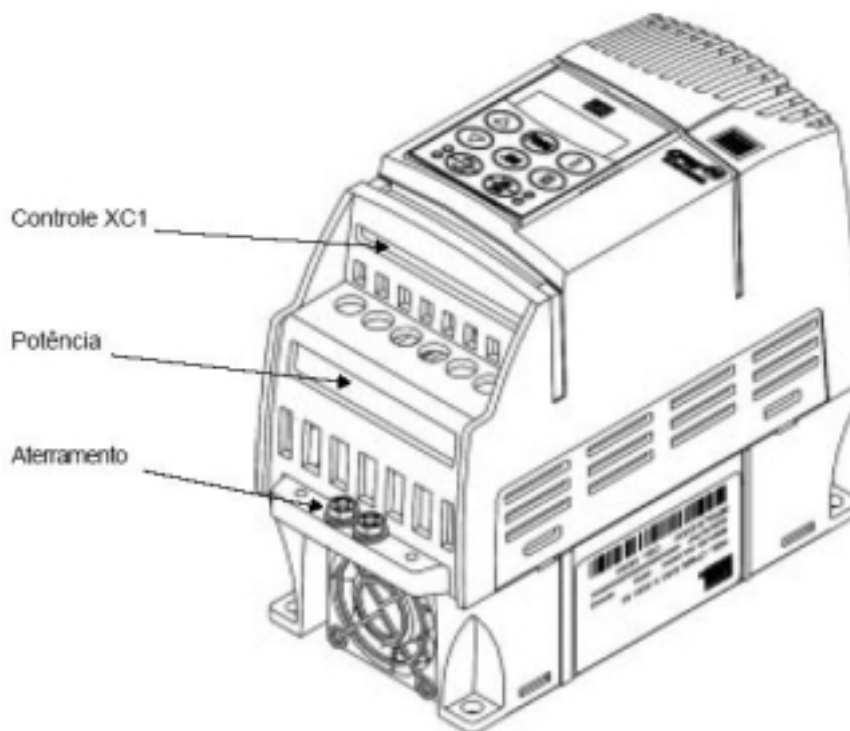


Figura 5.2 – Esquema retirado do manual do Inversor de frequência CFW08, mostrando o inversor de frequência e os pontos de ligações de controle, energia e aterramento.



Figura 5.3 – Esquema do Inversor de frequência CFW08, mostrando em detalhes os pontos de ligação do controle XC1.

O número de parâmetros operacionais dos inversores possui variações de modelo para modelo, assim como de fabricante para fabricante, não havendo, necessariamente, semelhança entre as metodologias aplicadas por fabricante. A quantidade de parâmetros disponíveis para o inversor de frequência CFW-08, figura 5.4, utilizado é superior a 200, definindo desde parâmetros operacionais do motor à curva de operação de aceleração do motor. Vale destacar as características do CFW-08 que dispensa o uso de sensores para o *feedback* da velocidade, torque e carga. Esta tecnologia, *Sensorless*, garante uma condição operacional igual ou muito próxima ao que foi especificado na operação. [31] [32]



Figura 5.4 –Inversor de frequência CFW08.

5.2 O Moinho Cerâmico de Bolas de Escala Laboratorial

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 pela NGK do Brasil, mostrado nas figuras 5.5 e 5.6. O moinho apresenta as características físico-químicas descritas na Tabela 5.1, fornecida pelo fabricante. As esferas usadas são mostradas na figura 5.5 e seu esquema mostrado na figura 5.7.



Figuras 5.5 - Componentes do moinho de bolas: esferas (ou bolas), moinho de bolas (cilindro, tampa e trava da tampa) e tampa transparente de policarbonato.

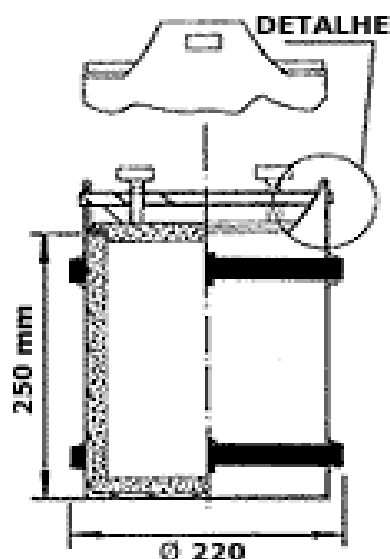


Figura 5.6 - Detalhes dimensionais (NGK do Brasil).

Tabela 5.1. Características físico-químicas do moinho cerâmico de bolas. (Especificações da empresa NGK, Cerâmicas Térmicas NTK)

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	¾ 0,1	250	90	Boa	Ótima

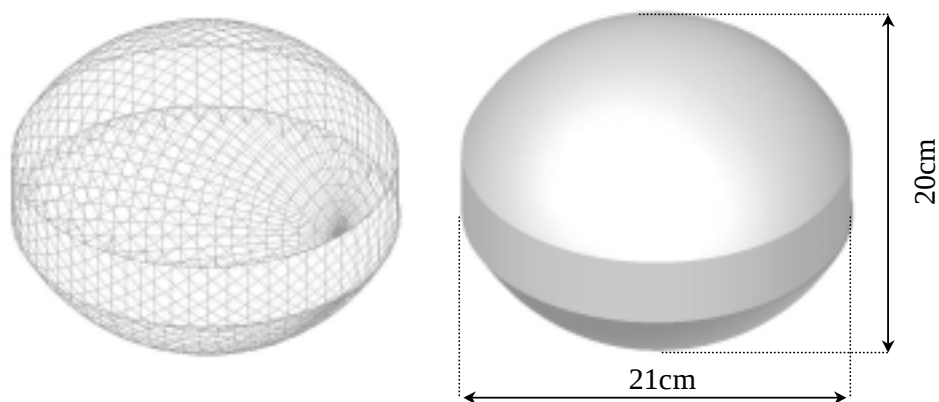


Figura 5.7 - Detalhes dimensionais das esferas usadas no processo de moagem

5.3 Construção da Mesa de Acionamento para Execução dos Ensaios de Moagem em Moinho de Bolas

Uma mesa para execução da moagem em moinho de bolas de escala laboratorial foi projetada e construída para execução dos ensaios. A mesa do moinho de bolas foi projetada no Laboratório de Tecnologia do Gesso do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, e construída na Oficina Mecânica do mesmo departamento, foi adotada a relação de transmissão de movimento para o moinho de bolas de 1 para 6,3. O esquema do projeto desse dispositivo está mostrado na figura 5.8.

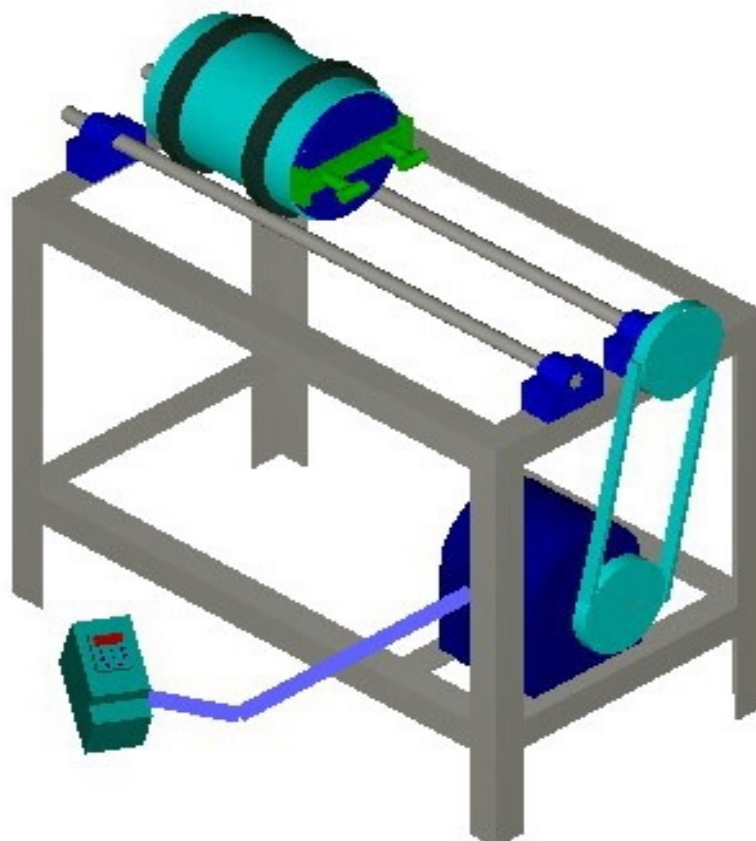


Figura 5.8 – Esquema da mesa para os ensaios de moagem com o moinho de bolas.

5.4 O Hardware de Controle Compact Fieldpoint

Para execução do ensaio foi necessário um equipamento para interligar o processo ao sistema de controle. Esse equipamento foi o *hardware* da National Instruments, denominado Compact Fieldpoint, que é utilizado para aplicações onde existe a necessidade de um equipamento robusto, flexível e com várias combinações de entrada e saída de sinais digitais e analógicos. A figura 5.9 mostra o Compact Fieldpoint.



Figura 5.9 – Hardware Compact Fieldpoint

O sistema de controle baseado em Compact Fieldpoint é similar ao funcionamento de um sistema baseado em Controladores Lógicos Programáveis (CLP) ou *hardwares* de controle industriais, uma vez que opera de forma a seguir um programa instalado em sua memória ou operar como um intermediário, realizando a monitoração, aquisição e transmissão das informações do processo.

O sistema Compact Fieldpoint funciona basicamente em dois tipos de condições operacionais. Na primeira, o sistema de aquisição em tempo real em condições de operação isolada (*stand-alone*) permite e especifica ao *hardware* Compact Fieldpoint a tomada de decisões com base na programação do aplicativo gerado em LabVIEW. A segunda opção é a utilização do Compact Fieldpoint como um meio intermediário ou interface de aquisição e transmissão de dados para o sistema de aquisição montado em um Servidor (*Server*) ou computador de controle.

As condições operacionais utilizadas pelo Compact Fieldpoint são mostradas esquematicamente na figura 5.10.

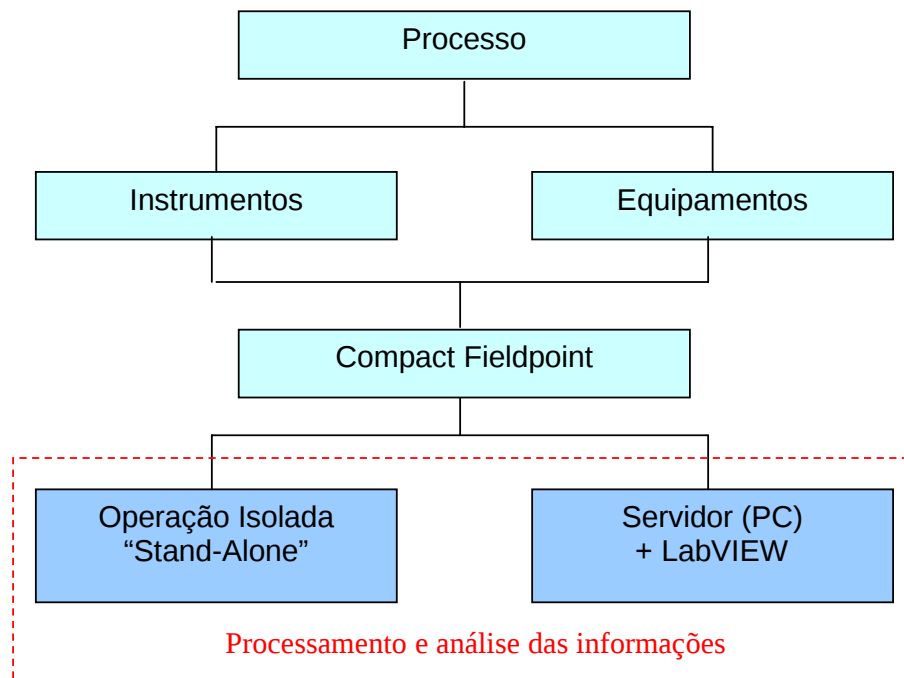


Figura 5.10 – Esquema da operação do *hardware* Compact Fieldpoint: operação isolada (*stand-alone*) sem necessitar de computador externo; e o sistema de aquisição de dados, em que o Compact Fieldpoint funciona apenas com meio de transmissão dos dados.

No primeiro caso, a operação do Compact Fieldpoint necessita de recursos adicionais: LabVIEW RT e o aplicativo para operação, tornando desnecessário o acesso ao computador controlador de forma constante, reduzindo assim o acesso ao servidor ou controlador do processo. A figura 5.11 mostra o esquema de operação nesta condição. Essa forma de operação otimiza a banda de transmissão de informações, pois o servidor passa a operar menos sobrecarregado, em virtude da redução de acessos ao Servidor.

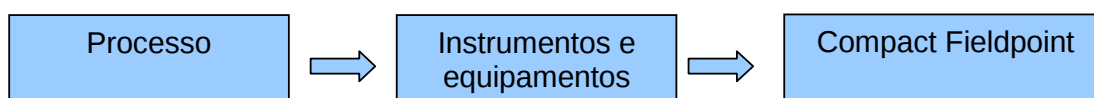


Figura 5.11 – Esquemática do sistema em operação *stand-alone*

Com a operação do Compact Fieldpoint na forma de realizar a aquisição de dados deve-se levar em consideração a velocidade de transmissão dos dados, ou seja, o meio utilizado para transmissão dos dados, visto que o processamento e a tomada de decisões são realizados em um servidor ou computadores (PC) definidos como controladores. A figura 5.12 mostra o esquema dessa configuração operacional. Quando se opera em condições de interface de aquisição de dados, há uma preocupação com a confiabilidade da transmissão de dados para o PC ou unidade de controle responsável pela tomada de decisões.

Em operações nas quais o Compact Fieldpoint seja usado como interface, devem-se considerar os atrasos advindos dos métodos de transmissão bem como a necessidade de se ter uma troca de informações constante e permanente da situação do processo, independentemente de haver mudança ou não no estado do processo.

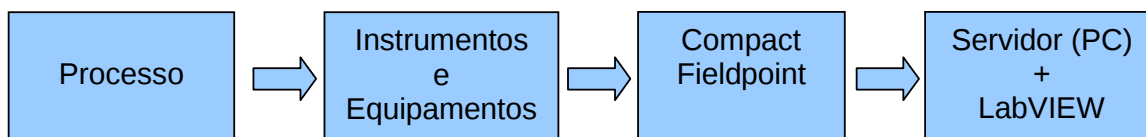


Figura 5.12 – Sistema em configuração para operação como interface de aquisição de dados

5.4.1 Os Módulos do Compact Fieldpoint Utilizados

- ✚ cFP-2020 - O módulo controlador do Compact Fieldpoint utilizado foi o processador de tempo real cFP-2020 com portas de comunicação serial e de rede (protocolo Ethernet), que comporta até 8 módulos de aquisição de dados. A figura 5.13 mostra o Controlador Compact Fieldpoint em uma visão superior do equipamento e uma visão das conexões de comunicação da lateral. [33]



Figura 5.13 – Controlador Compact Fieldpoint cFP-2020, vista superior (à esquerda); e vista lateral com as conexões em detalhe (à direita).

O Controlador do Compact Fieldpoint funciona como processador e controlador dos módulos de aquisição e transmissão de sinais e dados, e é, também, a porta de comunicação com o controle supervisor, caso esteja acoplado a uma rede de comunicação maior. A figura 5.14 mostra em detalhes as conexões e portas utilizadas pelo controlador cFP-2020.

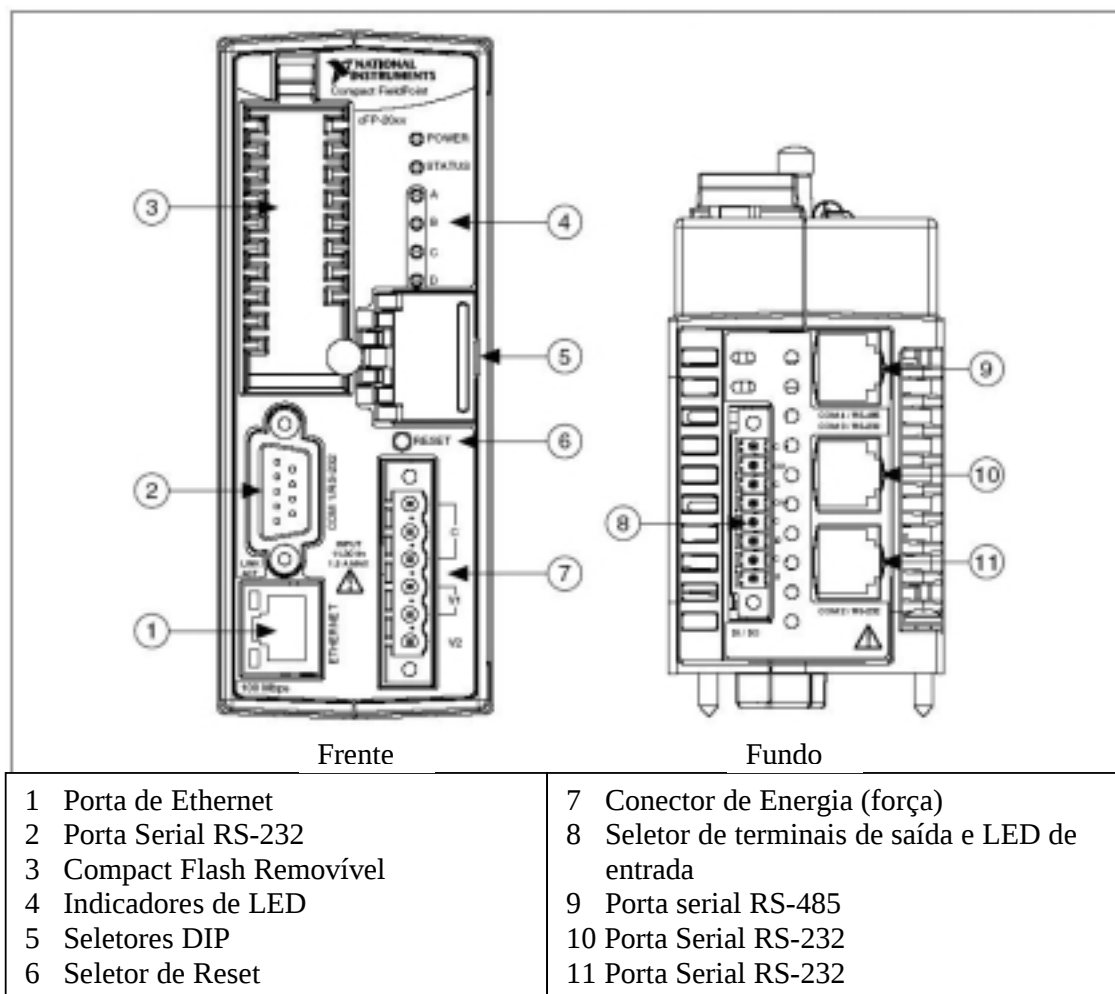


Figura 5.14 – Esquemático do Controlador cFP-2020. [33]

✚ cFP-RLY-421, figura 5.15, é o módulo de relés utilizado para chaveamento. [34]

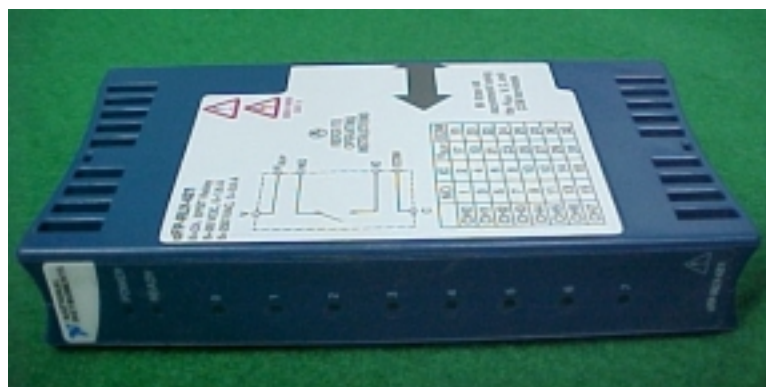


Figura 5.15 – Módulo cFP-RLY-421.

✚ cFP-AO-210, figura 5.16, é o módulo de saída analógica que funciona como potenciômetro para envio de sinais analógicos de 0 a 10 volts. [35]

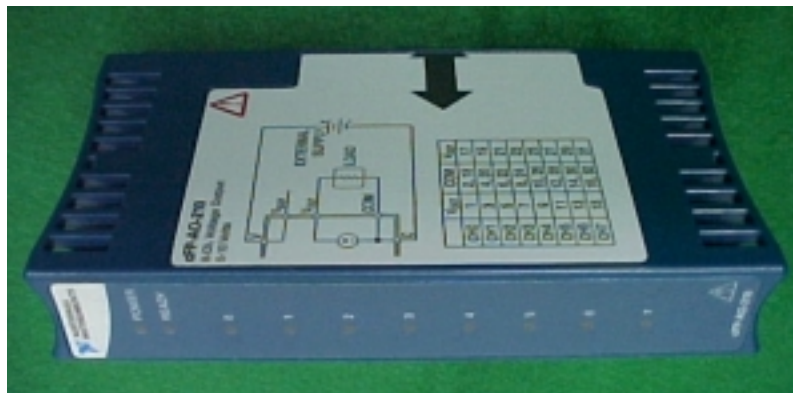


Figura 5.16 – Módulo cFP-AO-210.

✚ cFP-CB-1, módulos de conexões para ligação física entre o meio externo e o sistema Compact Fieldpoint, figuras 5.17, 5.18 e 5.19. Estes módulos são os responsáveis pelas entradas e saídas dos dados e sinais do Compact Fieldpoint para os instrumentos e equipamentos. [36]



Figura 5.17 – Módulo cFP-CB-1, módulo fechado



Figura 5.18 – Módulo cFP-CB-1, módulo aberto mostrando as conexões físicas.

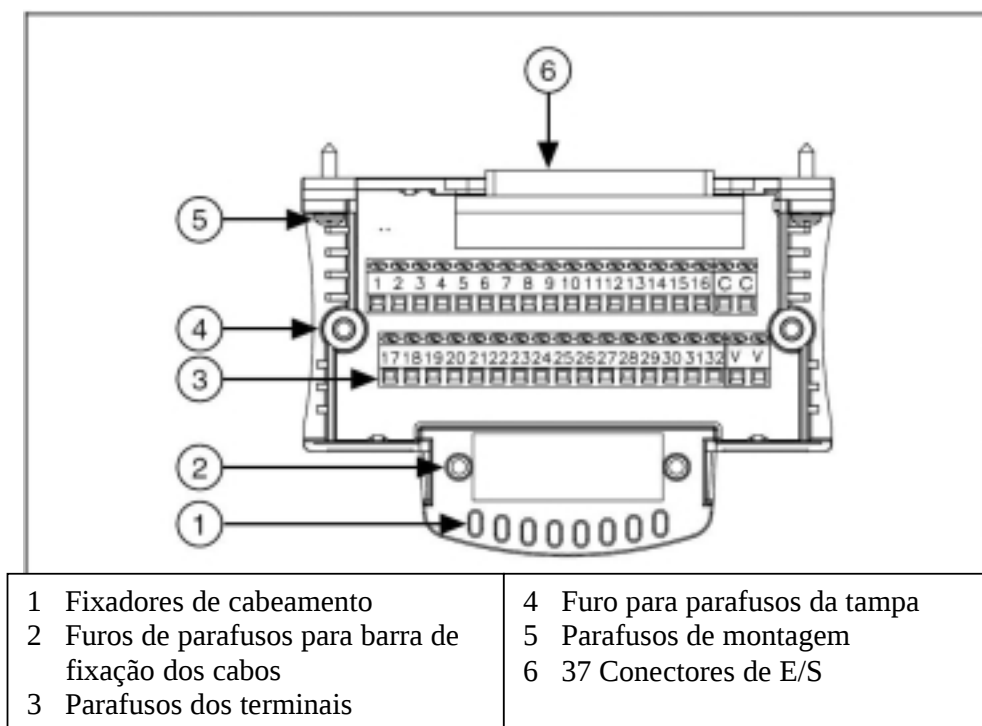


Figura 5.19 – Esquema do Módulo cFP-CB-1 aberto. [36]

✚ cFP-BP-8, *Backplane* ou base para conexão entre os módulos do Compact Fieldpoint. A figura 5.20 mostra onde são conectados os módulos do Compact Fieldpoint descritos anteriormente.

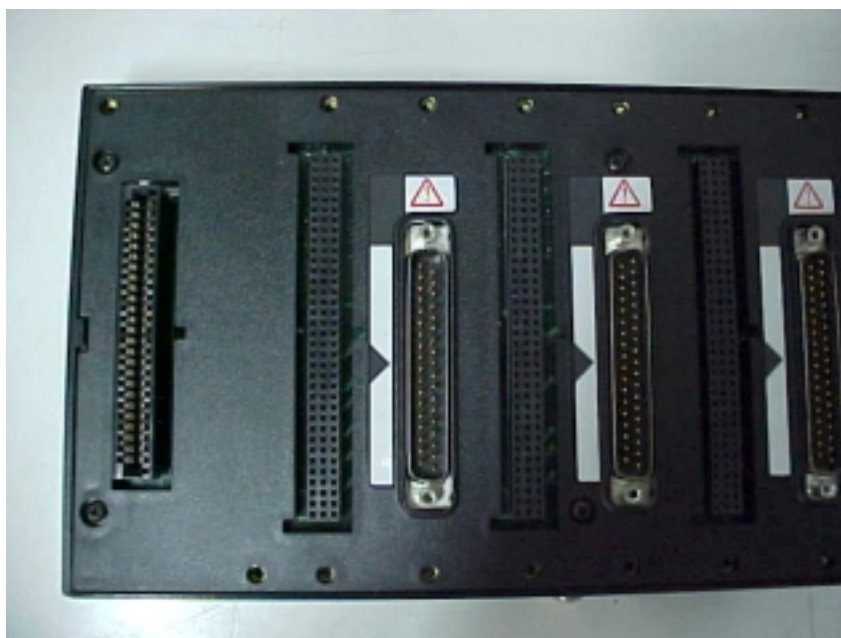


Figura 5.20 – Conector (*slot*) e integrador dos módulos do Compact Fieldpoint, cFP-BP-8.

5.5 Programas para Controle, Monitoração e Automação

Uma das ferramentas para controle e monitoração de processos é o *software* de controle, responsável pela parte lógica e virtual do processo. São *softwares* de programação para implementações de lógicas, algoritmos e compiladores mais recursivos e sofisticados, que acrescentam recursos para elaboração de soluções que suprem os requisitos exigidos pelas condições operacionais para melhoria dos processos (otimização, melhorias de qualidade, redução de falhas, redução de custo, etc.).

Uma das frentes de desenvolvimento de *softwares* que se têm mostrado promissoras é a de *softwares* simplificados e com recursos de programação suficientes para elaboração de programas de alto nível, classificados como programação de autoria. Utilizando-se de recursos gráficos e visuais, e bloco de comandos estruturados, facilita a programação de forma que o programa é visualizado como uma ferramenta simplificada para elaboração de soluções, seja em pesquisa ou em aplicações industriais, reduzindo a necessidade de experiência excessiva em programação especializada. Com essa metodologia, remove-se do pesquisador o fardo, muitas vezes excessivo, de estudar linguagens complexas e sofisticadas para satisfazer as necessidades do projeto ou da aplicação. Dessa forma, fica disponível uma linguagem de programação visual e simples, com ampla gama de recursos pré-elaborados (rotinas e programas já criados em forma de subprogramas a serem implementados) direcionados para elaboração de experimentos. [2] [7] [15]

Seguindo esse tipo de conceito, reduz-se a necessidade de adaptar soluções pré-existentes que podem apresentar uma solução não-direcionada para as necessidades dos trabalhos ou experimentos, ou que apresentam flexibilidade bastante comprometida. Observando essas características, a programação de autoria torna-se uma ferramenta bastante poderosa para realização de pesquisas e implementações de soluções tecnológicas de nível elevado, sem abrir mão da simplicidade e flexibilidade. Além disso, o tempo necessário para elaboração do código fonte (aplicativo) torna-se menor, disponibilizando assim mais tempo para elaboração dos experimentos em si. [13] [14]

5.5.1 O Software LabVIEW

Com os recentes avanços tecnológicos têm crescido as necessidades para execução das tarefas, a especialização das análises e o direcionamento dos experimentos, o que tem levado pesquisadores e engenheiros a trabalharem com *softwares* que tenham recursos suficientes para programação, de forma que os requisitos para os experimentos sejam supridos por meio da programação do aplicativo feito diretamente pelo pesquisador, em vez de uma adaptação de um programa ou aplicativo já desenvolvido, que muitas vezes não é suficiente, ou demanda um tempo de dedicação grande para tornar-se adequado, visto que suas aplicações geralmente possuem características únicas e necessidades particulares.

O uso do LabVIEW como ferramenta para desenvolvimento de aplicativos para execução de experimentos tem crescido cada vez mais, como mostrado nas referências bibliográficas. O LabVIEW tem sido usado para as mais diferentes operações, desde o uso em programas para auxiliar aceleradores de partículas até o auxílio em pesquisas biológicas, passando por operações industriais e processos. [1] [2] [9] [13] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25]

Os aplicativos gerados em LabVIEW têm acrescentado mais recursos aos experimentos, ao mesmo tempo em que auxilia os pesquisadores e engenheiros na geração do aplicativo necessário para o experimento. E, a partir do momento em que os pesquisadores e

engenheiros passam a realizar a programação, há um entendimento maior das necessidades e características do experimento, o que reduz falhas de comunicação e ajustes muitos elaborados e desnecessários.

Com base nas informações descritas anteriormente, foi selecionado o LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) da National Instruments para o controle do processo de moagem em moinho de bolas. O LabVIEW foi escolhido, em razão das vantagens enumeradas abaixo:

1. é um software mundialmente utilizado em centros de pesquisas e indústrias nas mais diferentes áreas (Engenharia, Nuclear, Biológicas, etc.);
2. faz uso das vantagens da programação gráfica;
3. existe uma grande quantidade de recursos de programação (recursos matemáticos, estatísticos, booleanos, etc.);
4. apresenta uma alta compatibilidade com equipamentos de vários fabricantes;
5. possui boa flexibilidade de programação por causa do uso de recursos visuais;
6. possui grande quantidade e tipos de interfaces homem-máquina;
7. dispõe de facilidade no aprendizado e uso do ambiente virtual de programação, DAQ (Data Acquisition) e instrumentação virtual.

5.5.2 O LabVIEW Real-Time (LabVIEW RT)

O Sistema operacional LabVIEW *Real-Time* tem como função oferecer um suporte e um sistema operacional estável para o funcionamento do *software* LabVIEW para aplicações que requerem performances determinísticas em tempo real e que não podem ser realizadas por um sistema operacional comum. Ou seja, o *software* LabVIEW não é um sistema operacional e necessita de um sistema operacional dedicado a sua operação.

Podem ser utilizados outros sistemas operacionais como o Windows ou o Linux, mas para se extrair a melhor performance para aplicações em tempo real foi utilizado o LabVIEW RT, que é um sistema operacional especialmente criado para auxiliar a execução do *software* LabVIEW. Mas isso só é válido se houver um *hardware* (*real time engine*) que suporte essa tecnologia de tempo real. O sistema de operação em tempo real é mostrado esquematicamente na figura 5.21.

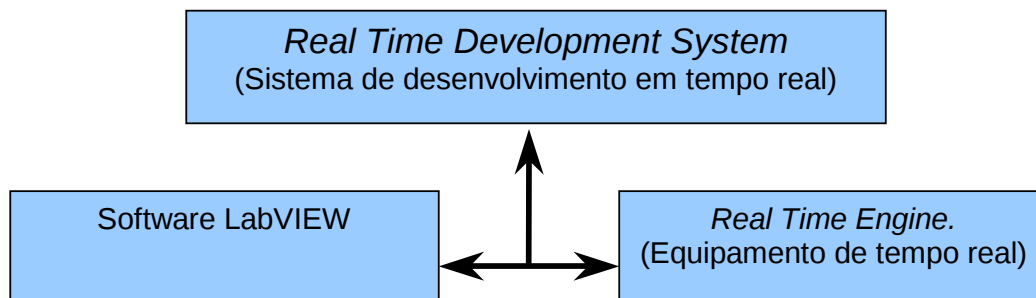


Figura 5.21 – Esquema de operação do *software* LabVIEW utilizando os recursos de tempo real em uma aplicação de tempo real.

O LabVIEW Real-time consiste de três componentes, como mostrado na figura 5.21: o *Software* LabVIEW, o *Real Time Development System* e o *Real Time Engine*. Quando o

executável entra em um universo de tempo real, o sistema passa para Real-Time Development System, e o Real-time Engine roda em um sistema operacional de tempo real.

Para que seja feita uma operação de forma adequada, essa formação deverá constar no projeto do sistema a fim de extrair a melhor performance, o que limita as soluções possíveis para as aplicações que utilizam esse sistema operacional. Ou seja, para a aplicação do sistema de tempo real, o sistema deverá ser formado de: *software* ou aplicativo + sistema operacional de tempo real + *hardware* de tempo real.

5.5.3 LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (LabVIEW DSC)

Outro exemplo de complemento do *software* LabVIEW é o módulo LabVIEW *Datalogging and Supervisory Control*, ou LabVIEW DSC. Esse módulo é o responsável pela utilização do LabVIEW em sistemas de supervisão, tendo, assim, os recursos de programação necessários para utilização com essa finalidade.

O módulo LabVIEW DSC oferece um complemento para o software LabVIEW, implementando recursos de sistemas de supervisão: recursos de instruções, esquemas, imagens e diagramas, alarmes, etc. Com esse complemento foi possível criar uma visualização mais completa do processo, podendo acrescentar mais detalhes na forma de diagrama e imagens. O LabVIEW DSC é uma ferramenta voltada para aplicações de maior porte e complexidade, acrescentando ao LabVIEW a capacidade e os recursos para lidar com esse tipo de aplicações, geralmente associados à Indústria.

O módulo LabVIEW DSC acrescentou uma visualização mais refinada para o controle e monitoração do processo de moagem em moinho de bolas, pois disponibilizou mais recursos visuais para implementação do sistema de controle, além de disponibilizar ferramentas de programação de sistemas de supervisão, como instruções, animações, alarmes, entre outros.

6. RESULTADOS

6. RESULTADOS

6.1 Mesa de Acionamento Construído para os Ensaio de Moagem em Moinho de Bolas

Para realização dos ensaios foi projetada e construída uma mesa de acionamento para execução dos ensaios de moagem em moinho de bolas mostrados nas figuras 6.1 e 6.2.



Figura 6.1 – Foto da mesa confeccionada para os ensaios com o moinho de bolas



Figura 6.2 – Foto da mesa para execução dos ensaios de moagem mostrando em destaque as polias para transmissão de movimento.

6.2 O Programa para Controle do Processo de Moagem em Moinho de Bolas

O conjunto formado pelo *software* e *hardware* apresentou uma forma de gerar soluções otimizadas, flexíveis e manipuláveis para a solução do processo de moagem em moinhos de bolas. Soluções, em caráter de pesquisa, sugerem uma vantagem no uso do LabVIEW, que apresenta uma linguagem de programação mais estruturada em forma de diagramas de fluxos, que facilitam a visualização e a manipulação dos códigos fontes para implementação de melhorias e modificações.

A programação do aplicativo para controle e monitoração do processo de moagem em moinho de bolas foi feita da seguinte forma:

1. definição dos parâmetros a serem controlados: magnitude da velocidade, partida e parada do motor, e inversão do sentido de rotação;
2. identificação das interfaces necessárias: velocímetros, gráficos, painéis e mostradores;
3. preparação das entradas e saídas de sinais digitais e analógicos: calibração dos sinais a serem transmitidos e recebidos pelo sistema de aquisição; blocos de comandos de conversão, tratamentos e processamento dos dados;
4. implementação da lógica operacional do controle e monitoração do processo e fluxo de dados;
5. inclusão de limitadores, comparadores e alertas para acompanhamento, monitoração e alertas para o operador;
6. refinamento das interfaces, alterando os instrumentos virtuais de forma a melhorar a apresentação e familiaridade dos painéis do aplicativo.

O programa gerado em LabVIEW seguiu duas etapas: a construção de uma primeira versão baseada em LabVIEW, e a segunda baseada em LabVIEW DSC.

Para os dois casos foram construídos painéis diferentes, embora as lógicas sejam bastante semelhantes. O painel gerado inicialmente foi o baseado em LabVIEW, mostrado na figura 6.3. Esse painel apresenta as características necessárias para operação do motor, acompanhamento da velocidade, controle da magnitude da velocidade, mudança de sentido de rotação, partida e parada do motor, e estado operacional.

A lógica de programação para elaboração deste painel está mostrada na figura 6.4, onde cada bloco representa uma série de instruções e comandos.

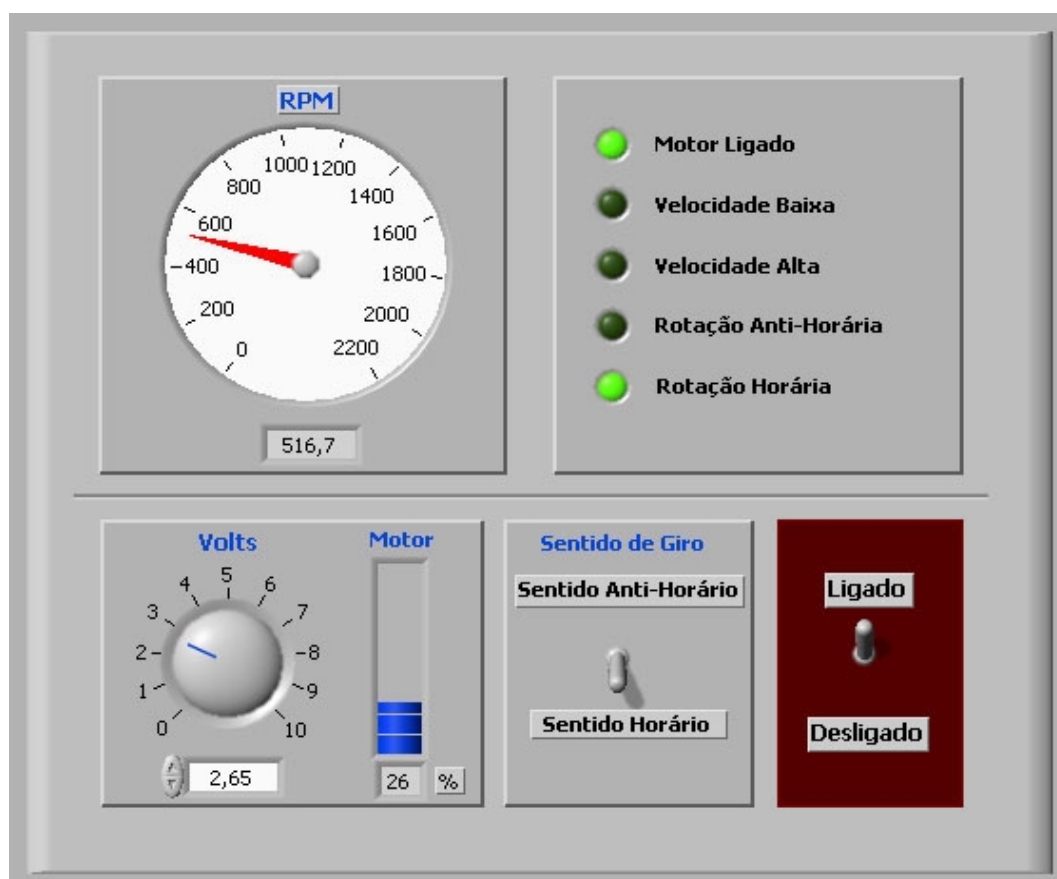


Figura 6.3 – Painel montado em LabVIEW para controle do processo de moagem

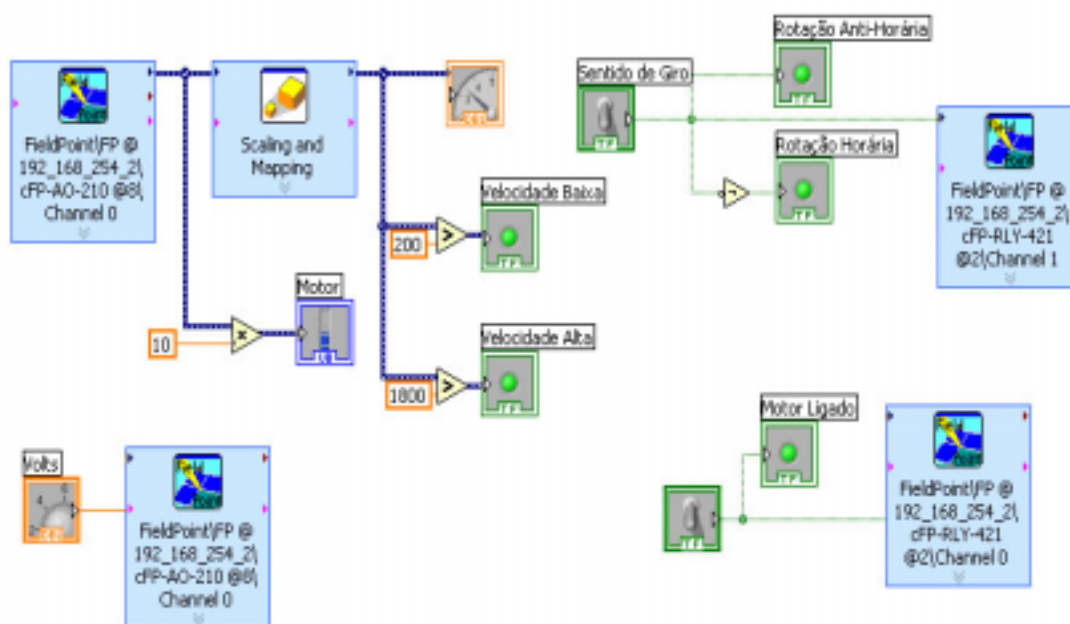


Figura 6.4 – Lógica da programação em LabVIEW para o controle do processo de moagem

A segunda etapa da geração do programa para controle do processo de moagem é baseada no LabVIEW utilizando recursos de sistemas de supervisão do LabVIEW DSC. O sistema montado utiliza recursos de sistemas de supervisão e tem uma apresentação visual mais elaborada e com mais detalhes. Pode-se implementar um acompanhamento visual de todo o processo de moagem, incluindo animações, sinais e botoeiras. Com o módulo LabVIEW DSC foi possível acrescentar alguns detalhes ao aplicativo inicial de forma a deixá-lo mais completo; a figura 6.5 mostra essa diferença. Comparando-se a figura 6.5 com a figura 6.3, verifica-se que há uma evolução visual considerável, com um acréscimo visual de todo o sistema, incluindo o estado dos componentes do processo.

A figura 6.5 mostra o sistema de controle e monitoração do processo de moagem em moinho de bolas de forma mais completa, visualizando todo o processo. São componentes deste sistema: os computadores e o Compact Fieldpoint ligados em rede, o inversor de frequência, o motor trifásico, o moinho de bolas e o painel de controle do processo.

A figura 6.6 mostra o novo painel gerado com o complemento LabVIEW DSC, onde houve o acréscimo de medições de temperatura, demarcado em vermelho. Isso acrescenta mais detalhes ao experimento, pois agora há a possibilidade de acompanhamento da temperatura do processo de moagem. A monitoração da temperatura é feita visualmente por termômetros, para medição instantânea, e de gráficos, para avaliação do comportamento e evolução do estado ao longo do tempo.

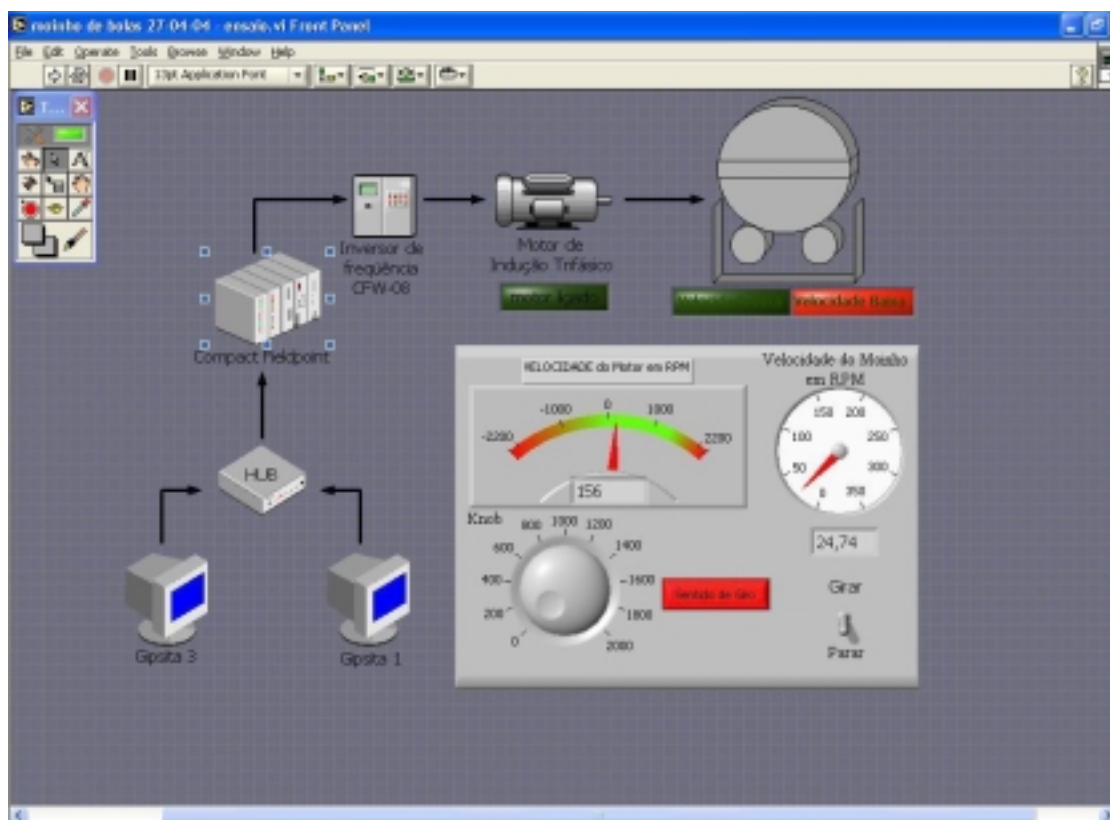


Figura 6.5 – Painel de controle e monitoração do processo de moagem utilizando os recursos do módulo LabVIEW DSC.

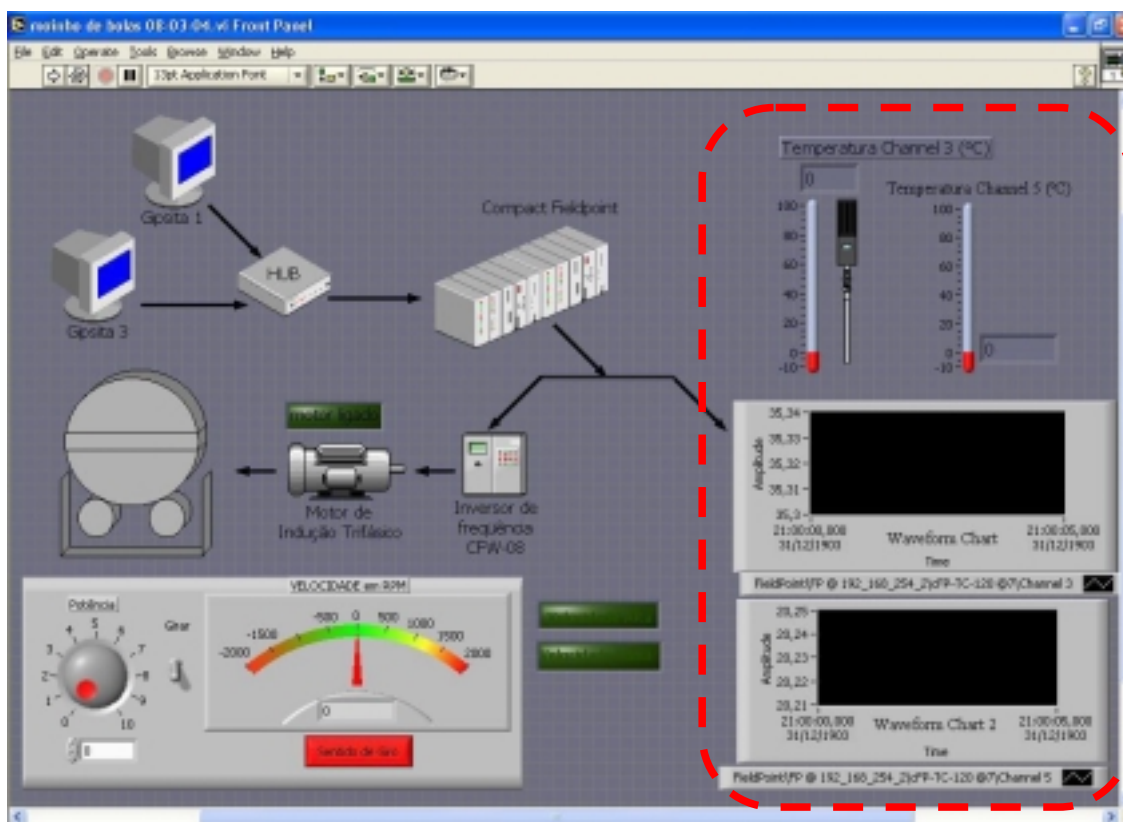


Figura 6.6 - Painel de controle e monitoração do processo de moagem utilizando os recursos do módulo LabVIEW DSC, com o acréscimo de uma monitoração (demarcado em vermelho) da temperatura.



Figura 6.7 – Painel Virtual gerado em programação LabVIEW (à esquerda) simulando o painel original (físico) do CFW-08 (à direita).

6.3 Condições Operacionais Escolhidas para os Ensaios

Foi elaborada uma tabela de condições de operação para realização do primeiro ensaio de avaliação, de forma a ter uma primeira imagem do que iria ocorrer durante o processo de moagem em moinho de bolas. Depois de realizado o ensaio inicial, coletados os dados e observado o comportamento durante o experimento, pôde-se montar uma nova tabela de condições de ensaios mais elaborada, baseada nos resultados obtidos pelo ensaio inicial e pelos dados coletados durante o período de análise de publicações.

A soma de todas essas informações gerou uma tabela com condições operacionais, referenciando a velocidade de rotação, o tamanho das esferas e o preenchimento do cilindro de moagem. As variações de velocidade de rotação no intervalos de 24 a 314 rpm foram utilizadas como parâmetros operacionais controláveis, assim como o fator de preenchimento do volume total do cilindro do moinho de bolas, preenchimentos de 10% a 30% do volume, com variações de 5%. As tabelas com os resultados são apresentadas nas tabelas 6.1 a 6.6.

Nessas condições, foi avaliado o funcionamento do moinho e anotado o comportamento das esferas no moinho de bolas. Um fator importante é que, durante os ensaios, não foi utilizado nenhum material a ser moído, dando assim o enfoque maior ao comportamento das esferas durante os ensaios nas condições operacionais definidas.

Durante os experimentos, pôde-se acompanhar a velocidade do motor trifásico na IHM do inversor de frequência e na IHM do aplicativo gerado pelo LabVIEW. Foi observada uma diferença entre as leituras das interfaces (inversor de frequência e LabVIEW) de até 2 rpm. Levando-se em consideração a ordem de grandeza das velocidades e a proporção da redução de velocidade através dos sistemas de transmissão de movimento, essa diferença pode ser desconsiderada. Tabela 6.6 apresenta os valores de velocidades comparados e registrados.

As variações de velocidade foram feitas via painel de acesso local, ou via protocolo Ethernet através do *hardware* Compact Fieldpoint e o *software* LabVIEW. Com os ensaios, várias fases que ocorrem durante o processo de moagem puderam ser observadas:

- ⊕ o deslizamento das esferas causado pela baixa velocidade;
- ⊕ o efeito cascata ou catarata, onde a moagem atinge a melhor condição de operação, e o efeito de impacto entre as esferas e o material a ser moído é maximizado;
- ⊕ a condição das esferas posicionadas nas paredes do moinho, causada pela força centrífuga devido à alta velocidade;
- ⊕ a condição de deslizamento das esferas em alta velocidade.

Tabela 6.1 – Tabela de Ensaio de Moagem em Moinho de Bolas em 10% de Preenchimento.

Ensaio para preenchimento de 10%

Diâmetro Esferas (mm)		21		Volume (litros)	5,4
	Motor/Eixo	Eixo/Moinho	Total	Altura (mm)	215
Fator de transmissão	1,0000	0,1583	0,1583	Diâmetro (mm)	180

Ensaio	Vel.motor (RPM)	Vel.Moinho (RPM)	Ângulo (θ)	Obs
1	150	24	30	Escorregamento
2	315	50	35	Escorregamento
3	505	80	40	Escorregamento
4	631	100	40	Escorregamento
5	757,2	120	45	Escorregamento
6	860	136	50	Escorregamento
7	946,5	150	50	Escorregamento
8	1136	180	55	Escorregamento
9	1262	200	60	Início de efeito cascata
10	1388	220	60	Efeito cascata
11	1577	250	65	Efeito cascata
12	1720	272	65	Efeito cascata
13	1767	280	70	Efeito cascata
14	1893	300	70	Efeito cascata
15	1956	310	55	Deslizamento
16	1980	314	-	Efeito da força Centrífuga

Tabela 6.2 – Tabela de Ensaio de Moagem em Moinho de Bolas em 15% de Preenchimento

Ensaio para preenchimento de 15%

Diâmetro Esferas (mm)		21		Volume (litros)	5,4
	Motor/Eixo	Eixo/Moinho	Total	Altura (mm)	215
Fator de transmissão	1,0000	0,1583	0,1583	Diâmetro (mm)	180

Ensaio	Vel.motor (RPM)	Vel.Moinho(RPM)	Ângulo (θ)	Obs
1	150	24	40	Escorregamento
2	315	50	40	Escorregamento
3	505	80	45	Escorregamento
4	631	100	50	Escorregamento
5	757,2	120	50	Escorregamento
6	860	136	50	Escorregamento
7	946,5	150	55	Escorregamento
8	1136	180	55	Início do efeito cascata
9	1262	200	60	Efeito Cascata
10	1388	220	60	Efeito Cascata
11	1577	250	55	Efeito Cascata
12	1720	272	40	efeito de escorregamento
13	1767	280	-	início da força centrífuga
14	1893	300	-	Efeito da força Centrífuga
15	1956	310		Efeito da força Centrífuga
16	1980	314	-	Efeito da força Centrífuga

Tabela 6.3 – Tabela de Ensaio de Moagem em Moinho de Bolas em 20% de Preenchimento
Ensaio para preenchimento de 20%

Diâmetro Esferas (mm)		21		Volume (litros)	5,4
	Motor/Eixo	Eixo/Moinho	Total	Altura (mm)	215
Fator de transmissão	1,0000	0,1583	0,1583	Diâmetro (mm)	180

Ensaio	Vel.motor (RPM)	Vel.Moinho(RPM)	Ângulo (θ)	Obs
1	150	24	35	Escorregamento
2	315	50	35	Escorregamento
3	505	80	45	Escorregamento
4	631	100	50	Escorregamento
5	757,2	120	55	Escorregamento
6	860	136	55	Escorregamento
7	946,5	150	60	Escorregamento
8	1136	180	65	Início do efeito cascata
9	1262	200	65	Efeito cascata
10	1388	220	60	Efeito cascata
11	1577	250	60	Efeito cascata
12	1720	272	65	Deslizamento
13	1767	280	-	Início da força centrífuga
14	1893	300	-	Efeito da força Centrífuga
15	1956	310	-	Efeito da força Centrífuga
16	1980	314	-	Efeito da força Centrífuga

Tabela 6.4 – Tabela de Ensaio de Moagem em Moinho de Bolas em 25% de Preenchimento
Ensaio para preenchimento de 25%

Diâmetro Esferas (mm)		21		Volume (litros)	5,4
	Motor/Eixo	Eixo/Moinho	Total	Altura (mm)	215
Fator de transmissão	1.0000	0.1583	0.1583	Diâmetro (mm)	180

Ensaio	Vel.motor (RPM)	Vel.Moinho(RPM)	Ângulo (θ)	Obs
1	150	24	35	Escorregamento
2	315	50	40	Escorregamento
3	505	80	42	Escorregamento
4	631	100	50	Escorregamento
5	757,2	120	50	Escorregamento
6	860	136	57	Início de efeito cascata
7	946,5	150	60	efeito cascata
8	1136	180	60	efeito cascata
9	1262	200	62	efeito cascata
10	1388	220	65	efeito cascata
11	1577	250	67	efeito cascata
12	1720	272	70	efeito cascata
13	1767	280	70	efeito cascata
14	1893	300	65	efeito cascata
15	1956	310	-	Início da força centrífuga
16	1980	314	-	efeito da força centrífuga

Tabela 6.5 – Tabela de Ensaio de Moagem em Moinho de Bolas em 30% de Preenchimento
Ensaio para preenchimento de 30%

Diâmetro Esferas (mm)		21		Volume (litros)	5,4
	Motor/Eixo	Eixo/Moinho	Total	Altura (mm)	215
Fator de transmissão	1,0000	0,1583	0,1583	Diâmetro (mm)	180

Ensaio	Vel.motor (RPM)	Vel.Moinho(RPM)	Ângulo (θ)	Obs
1	150	24	40	escorregamento
2	315	50	42	escorregamento
3	505	80	45	Início de efeito cascata
4	631	100	52	efeito cascata
5	757,2	120	55	efeito cascata
6	860	136	55	efeito cascata
7	946,5	150	57	efeito cascata
8	1136	180	60	efeito cascata
9	1262	200	65	efeito cascata
10	1388	220	65	efeito cascata
11	1577	250	70	efeito cascata
12	1720	272	75	efeito cascata
13	1767	280	-	Início da força Centrífuga
14	1893	300	-	Efeito da força Centrífuga
15	1956	310	-	Efeito da força Centrífuga
16	1980	314	-	Efeito da força Centrífuga

Tabela 6.6 – Tabela dos Comparativa dos valores de Velocidade entre o inversor de frequência, o aplicativo em LabVIEW e o Tacômetro.

Vol.	Velocidades															
	Escorregamento				Cascata				Deslizamento				Centripeta			
	Ref.	Prog.	Inv.	Taco.	Ref.	Prog.	Inv.	Taco.	Ref.	Prog.	Inv.	Taco.	Ref.	Prog.	Inv.	Taco.
10%	315	315,04	312,00		1262	1262,02	1260,00		1956	1956,04	1956,00		1980	1980,00	1971,00	
	50			46,20	200			198,00	310			303,00	314			305,90
15%	315	315,08	314,00		1136	1136,06	1137,00		1720	1720,12	1716,00		1767	1767,04	1764,00	
	50			46,20	180			178,00	272			267,00	280			273,40
20%	315	315,08	313,40		1136	1136,06	1137,00		1720	1720,12	1716,00		1767	1767,04	1764,00	
	50			46,20	180			177,60	272			268,30	280			273,40
25%	315	315,08	313,60		860	860,04	858,00						1956	1956,04	1947,00	
	50			46,20	136			133,20					310			300,90
30%	315	315,08	314,40		505	504,98	507,00						1767	1767,04	1764,00	
	50			46,20	80			77,40					280			273,00

- * **Ref** é a referência;
- * **Prog** é o valor digitado no programa;
- * **Inv** é o valor lido no inversor de frequência;
- * **Taco** é o valor lido no tacômetro.

A seguir são apresentadas as figuras 6.8 a 6.12, que mostram a mudança no regime de moagem em função da rotação e do fator de preenchimento do moinho durante os ensaios do moinho de bolas, em várias e combinadas condições de operação, onde:

- A** representa o deslizamento em baixa velocidade;
- B** representa o início do efeito cascata ou catarata;
- C** representa o início do deslizamento em alta velocidade;
- D** representa a alta velocidade gerando o início da força centrífuga.

Velocidade	A - 50 RPM	B - 200 RPM
Preenchimento 10%		
Velocidade	C - 310 RPM	D - 314 RPM
Preenchimento 10%		

Figura 6.8 – Para o fator de preenchimento do moinho para 10% do volume total.

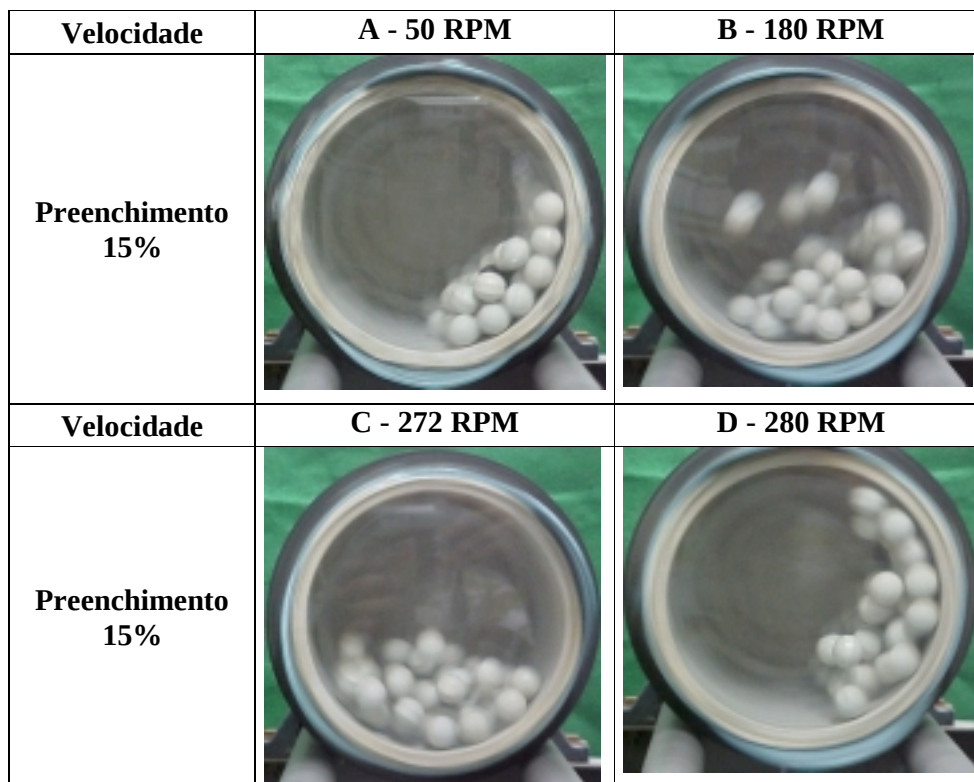


Figura 6.9 – Para o fator de preenchimento do moinho para 15% do volume total.

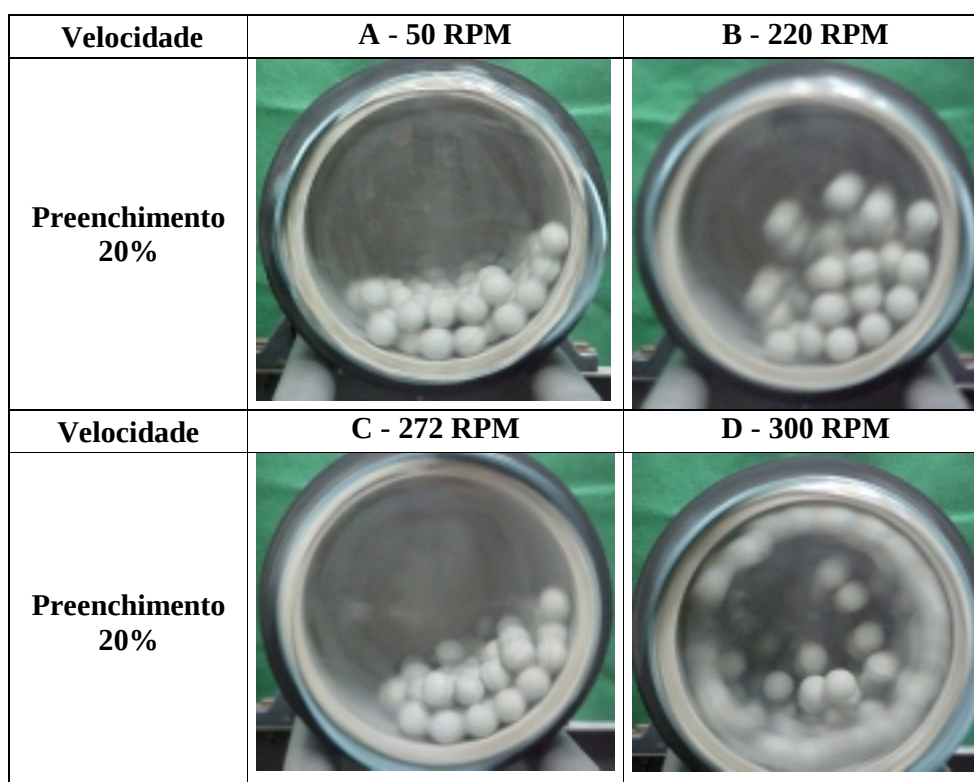


Figura 6.10 - Para o fator de preenchimento do moinho para 20% do volume total.

Velocidade	A - 50 RPM	B - 136 RPM
Preenchimento 25%		
Velocidade	C - RPM	D - 310 RPM
Preenchimento 25%	Não Observado o Deslizamento	

Figura 6.11 - Para o fator de preenchimento do moinho para 25% do volume total.

Velocidade	A - 50 RPM	B - 80 RPM
Preenchimento 30%		
Velocidade	C - RPM	D - 280 RPM
Preenchimento 30%	Não Observado o Deslizamento	

Figura 6.12 - Para o fator de preenchimento do moinho para 30% do volume total.

Durante os ensaios, uma condição de deslizamento em alta velocidade foi verificada. Uma fase entre o efeito cascata e o efeito da força centrífuga, em que o material passava a deslizar no fundo do moinho, de forma similar à condição de baixa velocidade, o que pode caracterizar um indicativo para o término do efeito catarata e o início do efeito da força centrífuga.

A condição de deslizamento em alta velocidade (C) não foi verificada nos ensaios de 25% e 30% por não ter coincidido com os valores de velocidades estimados para o ensaio, como ocorreram nos casos de 10%, 15% e 20%.

O levantamento dos dados do processo de moagem gerou o gráfico da figura 6.13, que possibilita demonstrar o comportamento das curvas de início do efeito cascata, início do efeito da força centrífuga e deslizamento de alta velocidade.

Além disso, com a avaliação do gráfico gerado pelos resultados do experimento, foi possível definir uma área estimada para operação do processo de moagem, garantindo, teoricamente, a ocorrência do efeito catarata para diferentes velocidades e fatores de preenchimento, desde que as condições operacionais realizadas sejam reproduzidas. Essa área de operação está demarcada em azul na figura 6.13.

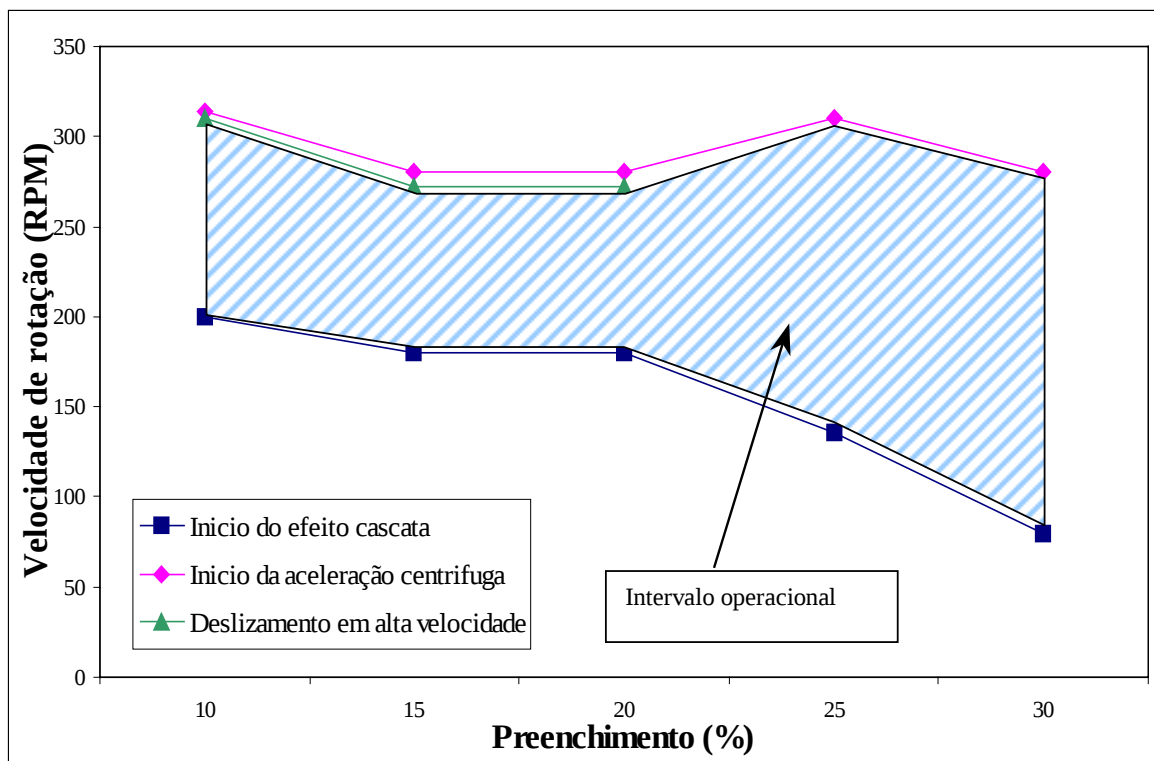


Figura 6.13 – Intervalo operacional para o moinho de bolas que garante (teoricamente) a condição para ocorrência do efeito catarata.

7. CONCLUSÕES

7. CONCLUSÕES

Na presente dissertação, foram desenvolvidos um sistema de controle através de uma combinação de equipamentos de controle composto por inversor de frequência, *hardware* de controle e aplicativos desenvolvidos utilizando LabVIEW, e um sistema mecânico para acionamento de moinho de bolas por um motor elétrico trifásico visando controle e monitoração da velocidade de rotação de um moinho de forma precisa.

Com o controle por meio de computadores, ou similares, é possível otimizar um processo que realiza tarefas em alta velocidade e de alto grau de repetibilidade, alcançando resultados almejados de forma mais homogêneas.

Com o inversor de frequência interligado ao motor de acionamento do sistema mecânico, realizando o controle das grandezas elétricas, pode-se ter acesso aos recursos de controle mais sofisticados. No presente caso, interligar o inversor de frequência a um sistema de controle operado remotamente. Com o *hardware* Compact Fieldpoint e o *software* LabVIEW foi possível implementar um controle sofisticado em termos de visualização e controle do processo de moagem. Ademais, o uso do LabVIEW combinado com o Compact Fieldpoint permitiu o controle e a monitoração flexíveis, condições operacionais mais eficientes e uma nova forma de visualização do processo, mais gráfica e intuitiva. Essa forma de visualização facilita e acelera o processo de elaboração de programas;

O controle da velocidade de rotação no processo de moagem, através da utilização de um sistema de controle baseado na tecnologia de inversor de frequência, apresentou resultados adequados. Possibilitou efetuar a variação da velocidade entre 24 e 314 rpm sem a necessidade de realizar alterações na planta de operação. Isso reduz drasticamente a necessidade de alterações nas instalações para se alcançar determinadas velocidades, assim como permite ter uma ampla faixa de variações de velocidades, curvas de aceleração, mudança de sentido de rotação, entre outras.

Fazendo uso da abordagem visual do LabVIEW, foi gerado também um painel virtual no qual os comandos do inversor de frequência foram emulados de forma clara e intuitiva, facilitando, assim, o entendimento e o monitoramento do processo por parte do operador tudo através do computador. A magnitude da velocidade de rotação pode ser modificada facilmente, e permite um controle refinado da velocidade de rotação do moinho. Com o sistema de controle implementado é possível condicionar o processo a um banco de dados, realizar implementações ou ampliar as capacidades do experimento, e facilitar a obtenção de dados para geração de gráficos (velocidade de rotação X fator de preenchimento) específicos para cada condição de moagem.

A partir de resultados obtidos, verificou-se que a implementação do sistema de controle e monitoração de um processo de moagem em moinho de bolas, objetivando gerar otimização, é uma alternativa com bons resultados quando requerer um controle preciso da velocidade rotação sem a necessidade de adquirir um novo sistema de acionamento mecânico. Ademais, os resultados obtidos foram satisfatórios e dentro das expectativas iniciais de resultados esperados.

O aplicativo gerado neste estudo ainda possibilita implementações e extensão de suas capacidades, o sistema atual tem a capacidade de absorver o controle de mais três sistemas de controle de moagem sem sofrer grandes modificações em sua estrutura ou lógica de programação. Além disso, foi possível realizar o controle do processo via rede de comunicação interna, ou seja, foi possível ter um controle remoto do processo.

Em princípio, para taxas de preenchimento maiores, os efeitos de catarata e cascata ocorrem em velocidades mais baixas, sugerindo uma redução no consumo de energia, desgaste, vibração;

8. PROJETOS FUTUROS

8. PROJETOS FUTUROS

A realização destes trabalhos sobre controle de moagem em moinho de bolas através do sistema de controle baseado em tecnologia LabVIEW e Compact Fieldpoint abriu novas idéias para expandir ainda mais as possibilidades deste experimento:

1. A implantação do controle via rede Internet, expandindo ainda mais as possibilidades de controle remoto do processo de moagem em moinho de bolas.
2. A implmentação de mais variáveis de processo no sistema de e controle do processo. A exemplo disso, pode-se considerar o realimentação (*feed-back*) da velocidade de rotação; a implementação da variável tempo; e a indicação de temperatura do processo.
3. Com a atual composição física do sistema de controle e monitoração é possível implementar mais 3 sistemas controle e monitoração do processo de moagem com características similares ao já em operação;
4. A implementação deste sistema de controle em uma linha de produção na Indústria; Em paralelo a condição de parte integrante de um projeto maior: Controle de forno tubular rotativo para calcinação da gipsita para produção de gesso.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NASA get signal on gray matter; Astronauts carry LabVIEW software on board Shuttle to study motion sickness. The Gale Group, CAPES, *Government Computer News*, vol.13, n.2, p35, 1994.
- [2] Harley-Davidson engineer evaluated labVIEW's graphical programming. *The Gale Group*, CAPES, *EDN*, vol.39, n.8, 1994.
- [3] DONG, H; MOYS, M.H. A technique to measure velocities of a ball moving in a tumbling mill and its applications. *Minerals Engineering*, South Africa, vol. 14, No. 8, p841-850, 2001
- [4] WITTENBERG, C. A pictorial human-computer interface concept for supervisory control. *Control Engineering Practice*, Germany, vol. 12, p865-878, 2004.
- [5] BAINBRIDGE, L. Ironies of Automation. *Automatica*, Great Britain, vol.19, no.6, p775-779, 1983.
- [6] MARTIN, T. Human software requirements engineering for computer-controlled manufacturing systems. *Automatica*, Great Britain, vol.19, no.6, p755-758, 1983.
- [7] HILS, D.D. Data Vis: A visual programming language for scientific visualization. *Association for Computing Machinery*, USA, ACM 089791-382-5/91/0003/0439, vol., p 439-448, 1991.
- [8] ONO, E.; SEKIYA, E.H.; TORIKAI, D.; GUSKEN, E.; SUZUKI C.K. Sistema de automação para controle da uniformidade geométrica de preformas para fibra ópticas. *Anais do 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF*. ABCM, FEMEC-UFU, Uberlândia, 2003.
- [9] GRIMONI, J.A.B.; LOPES V.J.S. A utilização do software LabVIEW no ensino experimental de sistemas de energia elétrica. Dept. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP, Brasil.
- [10] MARTINS, M.A.S.M.; RIBEIRO, M.R.R.; LOPES, E.S.L.; ARAÚJO, R.R.A.; MARQUES, Á.J.M.; BOUCHÉ, C.B.; GUYOT, O.G.; SILVA, E.S. Controle otimizante baseado em modelos matemáticos nos circuitos de moagem da CVRD DIPE – Vitória (ES) e CVRD Timbopeba – Mariana (MG). *XX Encontro de tratamentos de minérios e metalurgia extrativa*, Brasil, 2004.
- [11] WATANABE, H. Critical rotation speed for ball-milling. *Powder Technology*, Japan, vol.104, p95-99, 1999.
- [12] TARASIEWICZ, S.; RADZISZEWSKI, P. Grinding process simulation in a ball mill. *Mathl Comput. Modelling*, Département de Génie Mécanique - Université Laval, vol. 14, p 1072-1074, 1990.
- [13] FLANDORFER, H.; GEHRINGER, F.; HAYER, E. Individual solutions for control and data acquisition with PC. *Thermochimica Acta*, Austria, vol.382, p77-87, 2002.

- [14] JAMAL, R. Graphical object-oriented programming with LabVIEW. *Nuclear instruments & methods in physical research*, Germany, vol.A 352, p438-441, 1994.
- [15] GREGORY, M.E.; KEAY, P.J.; DEAN, P.; BULMER, M.; THORNHILL, N.F. A visual programming environment for bioprocess control. *Journal of Biotechnology*, United Kingdom, vol.33, p233-241, 1994.
- [16] HARRISON, I.R. Thermal Analysis of Polymers using virtual instruments – A tool for teaching and training. *Thermochimica Acta*, USA, 367-368, p85-92, 2001.
- [17] MORSE, D.H.; ANTOLAK, A.J.; BENCH, G.S.; ROBERTS, M.L. A flexible LabVIEWTM-based data acquisition and analysis system for scanning microscopy. *Nuclear instruments & methods in physical research*, USA, vol. B 158, p146-152, 1999.
- [18] GARCIA, R.F.; QUEIROZ, D.M.; MIYAGAKI, O.H.; PINTO, F.A.C. Programa computacional para aquisição de dados para avaliação de máquinas agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Brasil, vol.7, N.2, p375-381, 2003.
- [19] BETTIOL, A.A.; VAN KAN, J.A.; SUM, T.C.; WATT, F. A LabVIEWTM-based scanning and control system for proton beam micromachining. *Nuclear Instruments & methods in physical research*, Singapore, vol. B 181, p 49-53, 2001.
- [20] REITZ, F.B.; POLLACK, G.H. LabVIEW virtual instruments for calcium buffer calculations. *Computer methods and programs in biomedicine*, USA, vol. 70, p61-69, 2003.
- [21] HEINRICHS, G.; RONGEN, H.; JAMAL, R. Using LabVIEW for the design and control of digital signal processing systems simulation of the ultra slow extraction at COSY. *Nuclear instruments & methods in physical research*, Germany, vol. A 352, p449-454, 1994.
- [22] MOORE, J.H. Artificial intelligence programming with LabVIEW: genetic algorithms for instrumentation control and optimization. *Computer methods and programs in biomedicine*, USA, vol. 47, p73-79, 1995.
- [23] KOUTROULIS, E.; KALAITZAKIS, K. Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring. *Renewable Energy*, Greece, vol. 28, p139-152, 2003.
- [24] ABDELRAHMAN, M.; RASHEED, A. A methodology for development of a configurable remote access measurement system. *ISA Transactions*, USA, vol. 39, p441-458, 2000.
- [25] WHITLEY, K.N.; BLACKWELL, A.F. Visual programming: The outlook from academia and industry. USA & UK.
- [26] OGATA, K. Engenharia de controle Moderno. 3ª edição, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, Editora Prentice-Hall do Brasil Ltda., 1998. 817 páginas
- [27] LEIGH, J.R., Control Theory; A guided tour. London – UK, Peter Peregrinus Ltda., 1992, 182 páginas.

- [28] MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P.L. Engenharia de Automação Industrial. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2001. 298 páginas.
- [29] ROMANO, V.F. Robótica Industrial; aplicação na indústria de manufatura e de processos. 1ª Edição. São Paulo – SP, Brasil, Editora Edgard Blücher Ltda., 2002. 258 páginas.
- [30] GROOVER, M. P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 2nd Edition. Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall, 1987. 856 pages.
- [31] ROCKWELL AUTOMATION – ALLEN-BRADLEY, Tecnologia Sensorless Vector; o que separa essa tecnologia das outras? Tecnologias e filosofias de controle utilizadas nos inversores de frequência atuais.1336SV-1.5PT, 1997. 09 páginas.
- [32] WEG. Manual do Inversor de frequência. Série CFW-08, software versão 3.6X., 0899.4484 p/3. Brasil. 152 páginas.
- [33] NATIONAL INSTRUMENTS. Compact FieldPoint™. cFP-20xx and cFP-BP-x User Manual, Texas, USA, October 2002. Part Number 323386A-01. 98 pages.
- [34] NATIONAL INSTRUMENTS. Fieldpoint Operating Instructions. CFP-RLY-421 Eight-channel SPST relay module, Texas, USA, June 2003. Part Number 323617B-01. 14 pages
- [35] NATIONAL INSTRUMENTS. Fieldpoint Operating Instructions. FP-AO-210 AND CFP-AO-210, eight-channel 10 V analog output module, Texas, USA, October 2002. Part Number 323347A-01. 12 pages.
- [36] NATIONAL INSTRUMENTS. Fieldpoint Operating Instructions. cFP-CB-1 and cFP-CB-3 Compact FieldPoint connector blocks, Texas, USA, April 2003. Part Number 323322B-01. 12 pages.

GLOSSÁRIO

- A/D** – Analógico/Digital
- Aplicativo** - Programa criado em alguma linguagem de programação.
- CFP ou cFP** - Hardware Compact Fieldpoint da empresa National Instruments, USA.
- CLP** - Sigla para o Hardware Controlador Lógico Programável, ou Programmable Logic Controller (PLC).
- Código Fonte** – Listagem de comandos, algoritmos ou instruções para implementação em alguma linguagem de programação.
- DAQ** - Data Acquisition, aquisição de dados.
- Design** - Forma, estruturas, características e propriedades geométricas.
- Ethernet** - Tecnologia de arquitetura de local-area network (LAN).
- Hardware** – Recurso físico: Equipamento ou instrumento eletrônico, elétrico ou mecânico. Exemplificando: Inversor de frequência, computador, etc.
- IHM** - Interface homem-máquina, é a forma de comunicação entre o homem e a máquina. É o meio intermediário de entendimento da linguagem de comunicação humana e a linguagem de comunicação das máquinas. Pode ser definido também como Human-Machine Interface, HMI.
- LabVIEW** - Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, software da empresa National Instruments, USA.
- PID** – Controlador Proporcional Integral e derivativo.
- Processo** - Faz referência a um contexto maior: processos industriais, processos de fabricação, ensaios, experimentos, pesquisas, testes, entre outros. A utilização dessa palavra será freqüente e terá esse contexto inserido em seu significado. Define processo como uma operação ou desenvolvimento natural, que evolui progressiva e continuamente, caracterizado por uma série de mudanças graduais que se sucedem umas às outras, de um modo relativamente fixo e objetivando um resultado particular ou meta; ou uma operação artificial ou voluntária que evolui progressivamente e se constitui de uma série de ações controladas ou de movimentos sistematicamente dirigidos par se alcançar um determinado resultado ou meta. [26]
- Servidor** - Computador central responsável pelo processamento das informações, geralmente um computador de maior porte e capacidade; *Server*.
- Sistema** - É uma combinação de componentes que atuam em conjunto e realizam um certo objetivo . Um sistema não é limitado apenas a algo físico. O conceito de sistema pode ser aplicado a fenômenos abstratos, dinâmicos, como os encontrados em Economia. [26]
- Sistema Operacional** – Sistema de gerenciamento e operação de computadores. Ex: Windows, Linux, MS-DOS, LabVIEW RT, OS-2.
- Sistema de controle** – Sistema constituído por hardware e software que tem como função realizar, controlar e monitorar um processo.
- Software** – Recurso virtual: Programa, aplicativo ou algoritmo constituído de instruções, comandos e funções.
- Stand-Alone** - Operação de forma isolada, independente.
- VAD** - Vapor-phase Axial Deposition [6]
- VI** - Virtual Instrument, instrumento virtual, nome dos painéis e aplicativos gerados em LabVIEW.