

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS

Engenharia de Automação Industrial

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO
MINERAL ATRAVÉS DO CONTROLE DA PRESSÃO DE
ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE**

João Paulo Rodrigues de Magalhães

Araxá/MG

Dezembro de 2013

João Paulo Rodrigues de Magalhães

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO
MINERAL ATRAVÉS DO CONTROLE DA PRESSÃO DE
ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia de
Automação Industrial do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para
obtenção de graduação.

Orientador: Prof. Henrique José Avelar

Araxá/MG

Dezembro de 2013

Dedico aos meus pais e irmãos pelo amor, luta e
compreensão e por estarem sempre ao meu lado em
todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades que me foram dadas e pelos obstáculos que me ajudou a superar.

Aos meus pais, por todo esforço, luta, amor e dedicação que tiveram durante toda a minha vida, pois meu caráter é reflexo da educação que recebi principalmente dentro de casa.

Aos meus irmãos Daniel, Simone e Marco Aurélio pela amizade, carinho e por estarem ao meu lado nos momentos em que mais precisei. Espelho-me nas principais qualidades de cada um deles para seguir em frente.

A minha namorada Mariana, por sua paciência e compreensão nos momentos em que estive ausente e pelo amor e carinho nos últimos anos.

A todos os amigos que adquiri durante minha vida, pela amizade, companhia e momentos alegres e tristes que passamos juntos, me fazendo aprender a respeitar as diferenças entre as pessoas e valorizar suas qualidades.

A todos que fizeram parte da terceira turma de Engenharia de Automação Industrial, pelos inesquecíveis anos que passamos juntos no CEFET, conquistando verdadeiras amizades.

Ao meu orientador Henrique José Avelar, que me orientou com dedicação, tornando possível a realização deste trabalho.

A todos os professores, mestres e doutores que fizeram parte de minha vida acadêmica, me proporcionando além de conhecimentos técnicos, conhecimentos sobre humanidade.

A todos meus companheiros de serviço, pela experiência adquirida e por possibilitarem meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Enfim, agradeço a todos aqueles que fizeram parte da minha vida. Tudo que sou é reflexo de todos que conheci até hoje, daqueles que me proporcionaram momentos felizes me dando apoio e motivação e daqueles que de uma forma ou de outra me ofereceram obstáculos, ajudando no meu crescimento e desenvolvimento pessoal.

Obrigado!

Só se pode alcançar um grande êxito quando nos
mantemos fiéis a nós mesmos.

Friedrich Nietzsche.

RESUMO

Uma das operações unitárias de tratamento de minérios é a classificação mineral através de hidrociclones. Esta atividade consiste em separar uma polpa que alimenta os hidrociclones em duas partes de granulometrias distintas, visando obter um produto mais fino na saída do *Overflow* e um material mais grosso na saída do *Underflow*. Para que a classificação seja eficaz, é necessário controlar algumas das principais variáveis que influenciam no processo, tais como, granulometria, pressão e densidade da polpa na alimentação dos hidrociclones. Com base nessas informações, será implantado um controle de pressão de alimentação e controle de densidade da polpa em uma bateria de hidrociclones localizada no Complexo Mineral de Tapira, da empresa Vale Fertilizantes. Visando obter um controle da granulometria do produto final, foi feita a análise granulométrica em um laboratório químico. Os resultados da análise possibilitarão uma comparação do processo anterior com o processo após a melhoria implantada.

Palavras-chave: granulometria, controle de pressão, hidrociclone.

ABSTRACT

One of unit operations of mineral processing is mineral classification using hydrocyclones. This activity consists of separating a pulp feeding hydrocyclones into two parts of different granulometry, in order to obtain a finer product at the overflow and coarser material in the underflow. For classification is effective, it is necessary to control some variables that influence the process, such as granulometry, pressure and density of the pulp in the supply of hydrocyclones. Based on this information, we will deploy a control pressure supply and control of pulp density on a battery of hydrocyclones located in Mineral Complex Tapira, company Vale Fertilizantes. Order to obtain a control of granulometry of the final product, particle size analysis was done in a chemical laboratory. The results of the sampling will allow a comparison of the above process with the process after the implanted improvement.

Keywords: granulometry, pressure control, hydrocyclone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Componentes de um hidrociclone.....	19
Figura 2 – Hidrociclone.....	21
Figura 3 - Descarga do Underflow de um hidrociclone.....	24
Figura 4 - Sistema de controle de malha aberta.....	27
Figura 5 - Sistema de controle em malha fechada.....	28
Figura 6 – Curva de resposta ao degrau.....	30
Figura 7 – Oscilação sustentada com período P_{cr}	31
Figura 8 – Rack de testes com PLC da linha Quantum.....	36
Figura 9 – Quadro de Referências Utilizadas.....	38
Figura 10 – Módulos utilizados em um drop.....	39
Figura 11 – Quadro de variáveis declaradas.....	40
Figura 12 – Bateria de hidrociclones TA-1413116.....	42
Figura 13 - Transmissor de pressão instalado no distribuidor da bateria TA-1413116.....	43
Figura 14 – Sistema Supervisório – Processo de classificação bateria TA-1413116.....	44
Figura 15 – Controle de densidade da polpa que alimenta a bateria TA- 1413116.....	45
Figura 16 – Controle PID do nível da caixa que alimenta a bateria TA- 1413116.....	46
Figura 17 – Gráfico da pressão [Kg/cm ²] (azul) e densidade de polpa [g/cm ³] (vermelho) da bateria TA-1413116 referente aos dias 19 e 20 de Setembro de 2013.....	47
Figura 18 – Granulometria bateria TA-1413116 – 19 de Setembro de 2013.....	47
Figura 19 – Granulometria bateria TA-1413116 – 20 de Setembro de 2013.....	48
Figura 20 – Válvula “Mangote” com acionamento pneumático de dupla ação e posicionador para controle proporcional.....	51
Figura 21 – Hidrociclone modificado, retidados APEX e Vórtex e flangeado o Overflow.....	52

Figura 22 – Resposta da PCV à variação da pressão.....	54
Figura 23 – Ajuste de parâmetros da PCV no supervisor.....	54
Figura 24 – Gráfico da pressão [Kgf/cm ²] (azul) e densidade de polpa [g/cm ³] (vermelho) da bateria TA-1413116 referente aos dias 01 e 02 de Outubro de 2013.....	55
Figura 25 – Granulometria bateria TA-1413116 – 01 de Outubro de 2013.	56
Figura 26 – Granulometria bateria TA-1413116 – 02 de Outubro de 2013.	56
Figura 27 – Gráfico da pressão e densidade da bateria 1413116, correspondente aos dias 22 e 23 de Agosto de 2013. No gráfico foi plotado a densidade do material (vermelho) apenas para verificação se a mesma encontra-se constante.....	63
Figura 28 – Granulometria referente ao dia 01 de Agosto de 2013.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau (primeiro método).....	30
Tabela 2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} (segundo método).....	31

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- CEFET/MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- CMT – Complexo de Mineração de Tapira.
- CPU – Unidade Central de Processamento (central processing unit).
- IP – Internet Protocol.
- LED – Diodo Emissor de Luz (*Light-Emitting Diode*).
- LL – Lógica LADDER (*Ladder Logic*).
- PCV – Válvula de controle de pressão (*Pressure Control Valve*).
- PID – Proporcional Integral Derivativo.
- PIT – Transmissor Indicador de Pressão (*Pressure Indicator Transmitter*).
- PLC – Controlador Lógico Programável (*Programmable Logic Controller*).
- SCADA – Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition*).
- MODBUS – Protocolo de comunicação de dados utilizado em sistemas de automação.
- MODBUS PLUS – Protocolo de comunicação de dados utilizado em sistemas de automação, oferecendo alguns recursos a mais que o Modbus
- RS-485 – Padrão de comunicação serial.
- RS-232 – Padrão de comunicação serial.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	TRATAMENTO DE MINÉRIOS.....	15
2.1	GRANULOMETRIA.....	17
2.2	CLASSIFICAÇÃO.....	18
2.2.1	HIDROCICLONES.....	19
2.2.2	DEFINIÇÕES TÉCNICAS.....	20
2.2.3	HIDROCICLONAGEM.....	21
2.2.4	VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CLASSIFICAÇÃO.....	22
3.	TEORIA GERAL DE SISTEMAS.....	26
3.1	SISTEMAS DE CONTROLE.....	26
3.1.1	SISTEMAS DE CONTROLE DE MALHA ABERTA E DE MALHA FECHADA.....	27
3.2	CONTROLADORES PID.....	29
3.3	INSTRUMENTAÇÃO.....	32
3.4	AUTOMAÇÃO.....	34
3.4.1	CLP.....	35
3.4.2	PROGRAMAÇÃO.....	37
3.4.3	SUPERVISÓRIO.....	40
4.	DESENVOLVIMENTO.....	41
4.1	PROCESSO PRÉ-EXISTENTE.....	41
4.2	MELHORIA DO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO.....	51
4.2.1	RESULTADOS OBTIDOS.....	55
4.2.2	VANTAGENS.....	57
4.2.3	DESVANTAGENS.....	58
5.	CONCLUSÃO.....	59
7.	REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

As matérias-primas minerais são constantemente utilizadas nas indústrias a fim de se obterem produtos cada vez mais necessários nas indústrias químicas, metalúrgicas, alimentícia, dentre outras. A maioria destes minerais encontra-se de maneira escassa na crosta terrestre. Com base nas informações geológicas básicas, cabem às mineradoras realizarem pesquisas em busca de jazidas minerais, e quando encontradas, explorá-las de forma sustentável (LUZ, et al., 2010).

Os minerais encontrados na crosta terrestre possuem diversas formas e composições e dificilmente podem ser diretamente utilizados, necessitando assim de algum tipo de tratamento (OLIVEIRA e SOUZA, 2012). Depois de extraídos das jazidas minerais por meio de operações de lavra, os minérios vão para as usinas de beneficiamento, onde passam por diversos processos até que possuam características físicas e químicas exigidas por compradores interessados no produto final.

Entende-se por tratamento ou beneficiamento de minérios o conjunto de atividades responsáveis por transformar o minério bruto em produtos comercializáveis, através de operações básicas como fragmentação, classificação, separação magnética e disposição de rejeitos (VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

Os processos industriais estão constantemente sofrendo grande pressão para se tornarem mais lucrativos. Abaixar os custos é ponto crucial para quem procura aumentar os lucros, para isso algumas medidas são necessárias, como o aumento da produtividade e adoção de novas tecnologias, fazendo com que as indústrias adotem sistemas cada vez mais automatizados.

Neste contexto, a confiabilidade de sistemas de automação pode ser conceituada como a qualidade das informações envolvidas nas decisões tomadas pelos sistemas. Tais decisões a serem tomadas devem ser cada vez mais eficientes para que erros não comprometam a qualidade e a segurança do processo (QUEIROZ, 2013).

Outro conceito que deve ser destacado é o de disponibilidade do sistema, refere-se ao tempo máximo de funcionamento sem interrupção de um sistema de automação (QUEIROZ, 2013). A fim de aumentar a disponibilidade dos processos industriais, a intervenção do homem tende a diminuir, tornando assim os sistemas mais autônomos.

Inicialmente os sistemas de automação possuíam equipamentos de grande porte, com reduzida confiabilidade e disponibilidade. Atualmente os sistemas modernos contam com dispositivos de pequeno porte, com capacidade de processamento elevada e maiores confiabilidade e disponibilidade.

O Complexo de Mineração de Tapira (CMT), pertencente à Vale Fertilizantes S.A. ocupa uma área de 78.403.000 m², engloba atividades de lavra a céu aberto, beneficiamento do minério, mineroduto¹ e instalações de suporte (Sobre a Empresa: Vale Fertilizantes S.A., 2013).

Dentre as operações de beneficiamento realizadas na empresa, encontra-se a classificação mineral através de hidrociclones, cujo objetivo é colocar o minério dentro de uma faixa de granulometria² que atenda às especificações estabelecidas por seu cliente e em condições de ser bombeado pelo mineroduto.

Uma das variáveis de processo que interfere neste processo de classificação é a pressão de alimentação de cada ciclone, sendo que esta pressão define qual será o corte do material, ou seja, define qual a dimensão das partículas que se deseja obter no produto final.

Estudos realizados no CMT demonstraram que, tanto a pressão de alimentação na bateria de ciclones TA-1413116³ quanto à granulometria do produto final desta mesma bateria, obtida em análise física no Laboratório Químico, estavam sem nenhum tipo de controle automático, verificando assim a necessidade de implantação do mesmo. O processo de hidrociclonagem, além de estar sem controle, não possuía nenhum padrão de ajustagem de parâmetros, sendo que cada operador tentava controlar de forma manual a granulometria final do produto, através de manobras de operação.

1 Mineroduto: sistema de tubulações por onde se transporta minérios a longas distâncias.

2 Granulometria: tamanho dos grãos que constituem determinado material.

3 TA-1413116: TAG referente à bateria de ciclones 116.

O objetivo deste trabalho é implantar um sistema de controle PID para o processo de hidrociclonagem. Um posicionador foi instalado em uma das “válvulas on-off⁴” já montadas no campo, obtendo assim uma válvula de controle para atuar na pressão da bateria de ciclones. O ciclone, onde foi instalada a válvula de controle, perdeu sua função de classificação mineral, funcionando apenas como um duto de escape para controlar a pressão do processo, ou seja, foram retirados o Apex e o vortex, sobrando apenas as tubulações.

Foi feita uma programação no *Software Concept*⁵ da *Schneider*, na linguagem de programação *Ladder Logic 984*.

Efetuamos todas as montagens de campo, estabelecendo assim uma comunicação entre PLC, supervisor e instrumentos de campo.

Com este trabalho é esperada uma melhoria significativa do ponto de vista operacional e econômico, aumentando principalmente a disponibilidade e confiabilidade do sistema.

Este trabalho foi dividido da seguinte maneira:

Capítulo 2: Neste capítulo são citadas algumas atividades realizadas por uma mineradora, descrevendo conceitos importantes relacionados ao tratamento de minérios, como classificação mineral e hidrociclonagem.

Capítulo 3: Apresenta conceitos relacionados à teoria geral de sistemas, como por exemplo, sistemas de controle de malha fechada, controle de malha aberta, controle PID, automação e instrumentação.

Capítulo 4: É dedicado à metodologia aplicada ao projeto de melhoria de um sistema de classificação mineral, apresentando um sistema pré-existente e comparando com o projeto após as modificações implantadas, apresentando também os resultados obtidos.

Capítulo 5: Contém as conclusões e perspectivas futuras do projeto.

4 Válvula on-off: válvula que trabalha apenas fechada ou com 100% de abertura.

5 Concept: Software de programação para controladores Modicon Quantum, Momentum e Atrium.

2. TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Na atividade de mineração, os minérios que estão no subsolo são localizados, trazidos à superfície e então colocados em condições de uso para as mais diversas indústrias, tais como metalúrgica, cerâmica, mecânica, construção civil e química.

As principais atividades desenvolvidas dentro de uma mineradora são pesquisa mineral, lavra de mina, tratamento ou beneficiamento de minérios e deposição de rejeitos.

O tratamento de minérios é o processo de transformação do minério extraído do solo em que, ao final deste, o minério tratado possui determinadas especificações e condições de uso para outras indústrias. Segundo Chaves (1946) o tratamento de minérios pode ser descrito como: “o conjunto de operações unitárias de redução e separação de tamanhos, separação de espécies minerais e separação de sólidos e líquidos, bem como a arte de combiná-las em fluxogramas de modo a obter concentrados e produtos aceitáveis pelo mercado”. Este processo viabiliza o aproveitamento de diversos recursos minerais cada vez mais complexos, mesmo possuindo um baixo teor de substância útil. As características dos produtos obtidos após o tratamento de minérios estão relacionadas, principalmente à qualidade física e à composição química dos mesmos (VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

O beneficiamento, como toda atividade industrial, é uma atividade que tem uma finalidade econômica, visando aproveitar ao máximo os minerais extraídos do solo. Com a evolução da tecnologia é possível obter produtos úteis através de materiais que antes eram considerados em condições e especificações impróprias para o mercado.

Apesar de essa atividade estar voltada para o lucro, não se pode desprezar o conceito social, ou seja, o princípio da conservação dos recursos minerais, por se tratar de bens não renováveis. O aproveitamento dos recursos minerais deve estar sempre ligado ao conceito de desenvolvimento sustentável (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

Em todos os processos do tratamento de minérios são consideradas apenas as propriedades físicas da matéria, ou seja, não é realizada qualquer

alteração da estrutura química interna da matéria. Reações químicas, metalúrgicas e cerâmicas fogem do escopo do tratamento de minérios, sendo alguns exemplos de separação a catação, flotação, separação magnética e separação em meio denso (CHAVES, 1946).

As principais operações unitárias do tratamento ou beneficiamento de minérios são:

Britagem: considerado um dos primeiros estágios do tratamento de minérios, é responsável por quebrar o material extraído, geralmente de média ou grande dimensão, transformando-o em partículas menores;

Concentração: constitui-se de todo o processo de separação do material desejado do não desejado, colocando-o em um teor específico e pré-determinado;

Classificação em meio fluido: separação de um produto inicial em duas partes do mesmo que se diferenciam pelo tamanho relativo das partículas. Englobam as atividades de peneiramento e ciclonação;

Amostragem: processo de obtenção de uma amostra de tamanho necessário para que sejam feitas comparações, controle, verificações e testes físicos e químicos. Ex: composição química, granulometria, aferição de balanças integradoras, etc.

Filtragem: separação de uma mistura líquido-sólido, mediante a passagem da mesma por um filtro poroso, o qual retém as partículas sólidas e possibilita a passagem do líquido.

Moagem: processo responsável pela redução das partículas do material através de mecanismos de abrasão, arredondamento de partículas e quebra de pontas. Ex: moinhos de bolas e moinhos de barras.

Espessamento: adensa o material para ser utilizado em outra operação, como bombeamento e filtração. Além disso, em muitos processos de espessamento é possível recuperar e recircular parte da água usada no processo.

Desaguamento: redução da umidade do produto, deixando-o em condições exigidas por outras operações.

No presente trabalho será focado o processo de classificação mineral, mais especificamente classificação por hidrociclones.

2.1 GRANULOMETRIA

É muito difícil determinar exatamente os tamanhos das partículas minerais, pois sua forma é um fator que deve ser considerado. Em tratamento de minérios a definição de tamanho das partículas obedece a dois critérios (OLIVEIRA e SOUZA, 2012):

Retenção/Passagem em abertura geométrica: a determinação do tamanho das partículas é relacionada ao fato de elas ficarem retidas ou passarem por uma abertura geométrica padronizada.

Comportamento em meio fluido: o que define os tamanhos das partículas é como elas se comportam quando estão em meio fluido e sob a presença de forças naturais combinadas a forças introduzidas no sistema. Cada partícula pode se comportar de forma distinta dependendo do seu tamanho e geometria.

A análise granulométrica é o conhecimento da distribuição de tamanhos das partículas de um conjunto heterogêneo de partículas. Dentre os métodos conhecidos de fazer a análise, o mais utilizado é o peneiramento (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

Para facilitar o intercâmbio de informações em relação aos resultados obtidos nas análises granulométricas, tornou-se necessário a adoção de uma escala padrão, sendo a escala de Tyler a mais conhecida atualmente. No presente trabalho citaremos constantemente a malha de 100 mesh ou 100#. Para que as partículas de uma amostra passem por esta peneira, elas devem possuir tamanho inferior a 0,148 milímetros.

O processo de análise granulométrica consiste em determinar as porcentagens das amostras que ficam retidas em diversas malhas da escala, podendo ser feito a seco ou úmido. O resultado é obtido através da passagem do material por sucessivas peneiras cujas aberturas são cada vez menores. Este resultado se refere à fração da amostra que ficou retida em cada peneira.

2.2 CLASSIFICAÇÃO

Entende-se por classificação de minérios o processo responsável pela separação das partículas por tamanho. Este processo tem o objetivo de colocar e verificar se o produto encontra-se na granulometria adequada para o mercado, como também controlar o tamanho das partículas que são geradas nos processos de fragmentação.

Os classificadores, quando trabalham a úmido, têm o objetivo de separar o material em duas ou mais frações de tamanhos distintos, tomando como base a velocidade com que as partículas atravessam um meio fluido (MELO, 2010).

Os exemplos de classificadores mais comuns utilizados são:

Peneiras: utilizadas em processos que exigem separação mais grosseira, podendo operar a seco ou úmido. Geralmente trabalham com produtos da britagem.

Classificadores mecânicos: utilizados em partículas de média granulometria, em média menores que 0,1 mm. Usualmente operam a úmido. Ex: Parafuso sem fim e classificador espiral.

Ciclones: operam na separação de partículas médias ou mais finas, sendo que possuem uma ótima eficiência quando trabalham com as partículas mais finas. Ex: Hidrociclones (www.pormin.gov.br, 2013).

2.2.1 HIDROCICLONES

Hidrociclones são dispositivos que possuem uma seção cônica conectada a uma parte cilíndrica, utilizados na separação de misturas sólido-sólido, sólido-líquido, líquido-líquido e gás-líquido. São empregados na indústria desde o final do século XIX, inicialmente em processos de separação de areia de águas (ARRUDA, 2008).

Estão agrupados em famílias, onde a característica marcante de cada família está associada à relação constante de suas medidas geométricas (SVAROVSKY, 1990). Segundo Castilho e Medronho (2003), as famílias mais conhecidas de hidrociclones são Rietema, Krebs e Bradley.

Amplamente utilizados na indústria mineral devido ao seu baixo custo de investimento e manutenção, não possuem partes móveis, são versáteis e de estruturas compactas, permitindo uma maior flexibilidade na montagem de um novo projeto. A figura 1 a seguir ilustra os componentes de um hidrociclone.

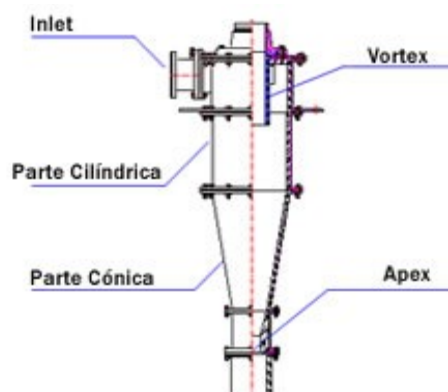


Figura 1 – Componentes de um hidrociclone.

Fonte: <http://www.icba.com.pe/h-hidrociclones.html>, 2013.

2.2.2 DEFINIÇÕES TÉCNICAS

Vórtex: também conhecido como *vortex finder*, tem a função de conduzir a fração mais fina da alimentação para o *overflow*. Estende-se até abaixo da entrada de alimentação para minimizar o efeito de curto circuito das partículas grosseiras. Geralmente possui diâmetro interno entre 35 a 40% do diâmetro do ciclone, podendo variar dentro de certos limites para atender o tipo de aplicação.

Apex: localiza-se logo abaixo da parte cônica, sendo responsável por descarregar a fração grosseira da alimentação, consideravelmente menor que o vórtex, porém não sendo inferior a $\frac{1}{4}$ do tamanho do vórtex.

D50 ou Diâmetro de corte: é uma determinada granulometria específica que considera a probabilidade do ciclone repartir o material ao meio, ou seja, a mesma quantidade que vai para o *under* também vai para o *over*;

D95: diâmetro pelo qual passa 95% do material que vai para o *Overflow*, sendo este o material mais fino;

BY PASS: No campo da mineração, é a granulometria mais fina que as partículas grossas em conjunto com a água arrastam para o *Underflow*. Este efeito é indesejável no processo de classificação, pois essas partículas finas deveriam ir para o *Overflow*;

Partição: em uma operação de classificação é a porcentagem em massa referente à alimentação que passa para o *Under*.

$$\text{Partição} = U/A = [(A-O) / (U-O)] \times 100$$

U = massa de material que vai para o *Underflow*.

O = massa de material que vai para o *Overflow*.

A = massa de alimentação.

2.2.3 HIDROCICLONAGEM

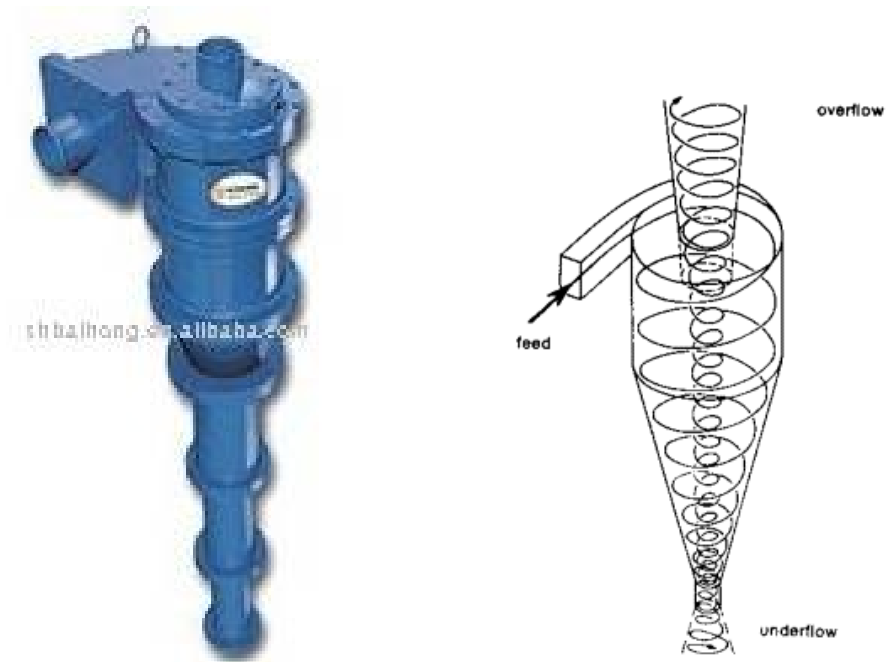


Figura 2 – Hidrociclone.

Fonte <http://pt.wikipedia.org/wiki/Hidrociclone>.

O princípio básico de separação empregado nos hidrociclones é de sedimentação centrífuga. A polpa de alimentação é injetada sobre pressão na parte cilíndrica do ciclone, isto cria movimento circular descendente em espiral direcionado para o *Underflow*, observar Figura 1. Essa força centrífuga criada a partir do movimento de rotação da massa girando com velocidade angular w em um raio r , pode ser expressa como:

$$F_c = m \cdot r \cdot w^2 \quad \text{ou} \quad F_c = m \cdot v^2 / r$$

Onde:

F_c = Força centrífuga.

m = massa das partículas.

r = raio da parte cilíndrica do ciclone.

w = velocidade angular.

v = velocidade tangencial.

A área da seção do orifício de entrada tem a função de controlar a velocidade de entrada da polpa e manter um padrão uniforme do fluxo neste ponto, desta forma evita-se uma turbulência dentro do hidrociclone, como também um curto circuito de partículas grosseiras para o *Vórtex finder* (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

O movimento circular da polpa cria uma pressão negativa dentro do ciclone, fazendo com que haja sucção do ar atmosférico através do *Apex*, com isso uma parte do material é carregada, passando pelo *Vórtex* e indo em direção ao *Overflow*. Esse núcleo gasoso formado é importante no processo de partição, pois sua ausência causa queda de pressão e diminuição da eficiência de separação (MEDRONHO, 2003).

As partículas mais grosseiras e pesadas são forçadas para as laterais do hidrociclone devido à força centrífuga que atua sobre elas, sendo assim elas são transportadas para o *Under*. Já as partículas mais leves e menores ficam mais ao centro do ciclone, sendo carregadas para o *Over* através da força de arraste provocada pelo ar atmosférico que provém do *Apex*.

Essa relação de separação das partículas está diretamente ligada à resultante das forças exercidas sobre elas, ou seja, se a força de arraste for maior que a força centrífuga as partículas se moverão radialmente para o interior do ciclone; se a força centrífuga for maior que a força de arraste, as partículas se moverão radialmente para as laterais (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

2.2.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CLASSIFICAÇÃO

As variáveis que definem a eficiência ou performance dos hidrociclones podem ser classificadas em dois diferentes grupos, variáveis de operação do processo e variáveis de projeto, ou seja, aquelas associadas ao dimensionamento e geometria do ciclone.

VARIÁVEIS DE PROJETO:

Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone: o diâmetro do ciclone está relacionado à capacidade do mesmo, ou seja, quanto maior o tamanho, maior será sua capacidade, porém ciclones de maior tamanho promovem uma separação mais grosseira.

Diâmetro de entrada (Inlet): aumentando a área de alimentação do ciclone a sua capacidade aumenta, porém a pressão de admissão diminui para uma mesma alimentação, com esta queda de pressão a velocidade tangencial também diminui, afetando assim a separação e gerando uma separação mais grossa.

Comprimento da seção cilíndrica: com o aumento do comprimento da seção cilíndrica, mais fino será o corte.

Ângulo da parte cônica: a parte cônica tem a função de direcionar o material mais grosseiro para o centro, obtendo-se um *underflow* mais espesso. Aumentando o ângulo de um ciclone de mesmo diâmetro, obtém-se um corte mais grosso.

Diâmetro do Vortex: quanto maior o diâmetro do *Vortex*, mais grosseiro será o corte, pois facilitará o escoamento do material por esse orifício, é também onde passa a maior parte da água.

Diâmetro do Apex: este diâmetro é que define a capacidade de descarga e a porcentagem de sólidos no *Underflow*. Dependendo do diâmetro do *Apex*, temos uma forma diferente de descarga, sendo esta em cordão (*Apex* muito pequeno), em *spray* (*Apex* muito grande) e em cone (*Apex* bem dimensionado). A Figura 3 ilustra os diferentes tipos de descargas do *underflow* de um hidrociclone.

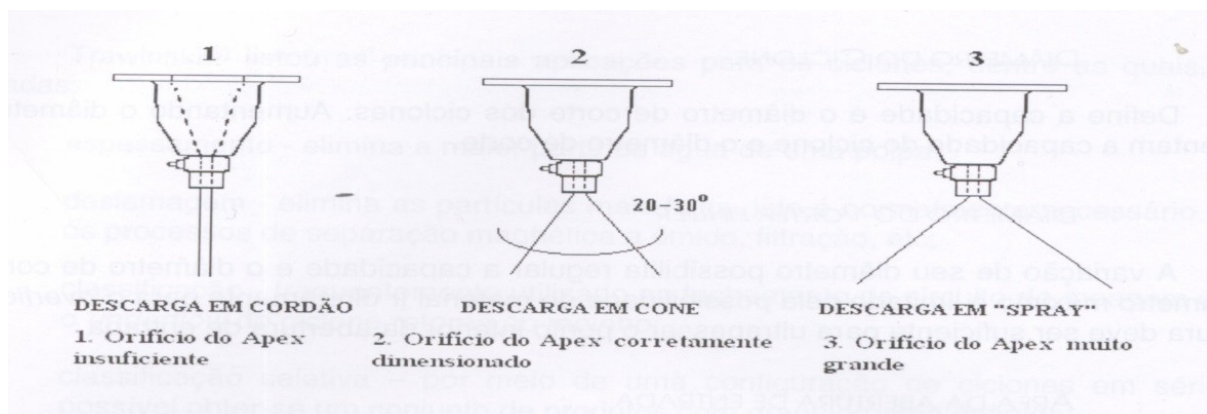


Figura 3 - Descarga do Underflow de um hidrociclone.

Fonte: Adaptação do autor (OLIVEIRA e SOUZA, 2012, p. 141).

Posição de montagem: os ciclones podem ser instalados tanto na posição horizontal quanto na vertical e possuem a mesma eficiência, a diferença é que na horizontal os ciclones operam com uma pressão de alimentação mais baixa, conseqüentemente o desgaste nos componentes é menor (bomba, tubulação e revestimento).

VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO DO PROCESSO:

Porcentagem de sólidos na alimentação: quanto maior a porcentagem de sólidos na alimentação, mais grosso será o corte do ciclone. A densidade e a viscosidade da polpa estão intimamente relacionadas à porcentagem de sólidos.

Pressão de alimentação: com o aumento da pressão de alimentação, a força centrífuga que atua sobre as partículas também aumenta, isso faz com que as de maior tamanho sejam arremessadas para as paredes do ciclone forçando-as para o *Underflow*, sendo assim o corte será mais fino.

Distribuição granulométrica da alimentação: a granulometria das partículas presentes na alimentação dos hidrociclones é proporcional ao diâmetro de corte do mesmo. Caso a alimentação contenha partículas mais finas as forças de arraste e centrífuga atuam nestas partículas, fazendo com que o material que sai pelo *Over* e pelo *Under* seja mais fino.

Viscosidade da polpa de alimentação: diretamente relacionada à porcentagem de sólidos e à presença de partículas ultra-finas. A viscosidade aumenta com o aumento da densidade da polpa de alimentação, gerando assim um engrossamento no corte do ciclone.

Peso específico dos sólidos: com a alteração da massa das partículas e do peso específico das mesmas, a força centrífuga que atua nas partículas também é alterada. O aumento do peso específico médio dos sólidos gera um afinamento no corte.

3. TEORIA GERAL DE SISTEMAS

3.1 SISTEMAS DE CONTROLE

Entende-se por sistema o conjunto de componentes que trabalham em sintonia para atingir determinado objetivo em comum, sendo que estes sistemas podem ser físicos, computacionais, biológicos dentre outros.

Os sistemas de controle formam uma configuração que, através de parâmetros de entrada conhecidos, determinam uma saída desejada do sistema, ou seja, um sinal de entrada é processado gerando uma saída variável formando assim uma relação de causa e efeito (DORF e BISHOP, 2001).

O aumento da complexidade de sistemas de controle e o interesse em se obter sistemas com desempenho cada vez maior provocaram o aparecimento de sistemas com múltiplas variáveis, sendo criados assim os sistemas de controle multivariáveis, capaz de processar e inter-relacionar diversos componentes de um mesmo sistema.

Algumas definições importantes, em relação a sistemas de controle, devem ser consideradas no estudo deste projeto (OGATA, 2010):

Processo: é o conjunto de ações e movimentos controlados de uma operação contínua a fim de se atingir determinado objetivo. Neste trabalho definiremos processo como uma operação a ser controlada.

Variável controlada: é a condição ou a grandeza que se deseja controlar, ou seja, medir a variável controlada e aplicar um sinal de controle ao sistema para atingir um valor desejado.

Variável manipulada: é a grandeza ou variável do sistema que é modificada pelo controlador, a fim de obter um valor desejado da variável controlada.

Distúrbios: são todos os sinais que tendem a afetar o sinal de saída de um sistema, classificam-se em distúrbios internos, quando gerados pelo próprio sistema, e distúrbios externos, quando originados fora dos sistemas, tornando-se sinais de entrada.

3.1.1 SISTEMAS DE CONTROLE DE MALHA ABERTA E DE MALHA FECHADA

Segundo OGATA (2010), em um sistema de controle de malha aberta o sinal de saída não exerce nenhuma função de controle sobre o sistema, este sinal não é medido e realimentado, sendo assim, não interfere no sinal de entrada. A saída do sistema não é comparada com a entrada de referência, com isso cada entrada do sistema corresponde a uma condição fixa de operação.

A precisão de um sistema de controle de malha aberta depende de uma calibração, sendo que este só pode operar corretamente quando se conhece a relação entre a entrada e a saída, sendo assim não pode existir a presença de distúrbios internos e externos. Exemplos de sistemas não realimentados (Figura 4) são sistemas que operam apenas em função do tempo, como um controle de tráfego com semáforos tradicionais ou uma máquina de lavar roupas.



Figura 4 - Sistema de controle de malha aberta.

Fonte: Adaptação do autor (DORF e BISHOP, 2001, p. 2).

Um sistema de malha fechada (Figura 5) estabelece uma relação de comparação entre as saídas e entradas de referência, assim utilizam a diferença entre estes sinais como meio de controle. São considerados como sistemas de controle com realimentação. A diferença entre um sinal de saída e um sinal de entrada é conhecida como sinal de erro atuante, sendo que este sinal realimenta o controlador que, através de funções de controle, tende a minimizar este erro, obtendo um sinal desejado na saída (OGATA, 2010).

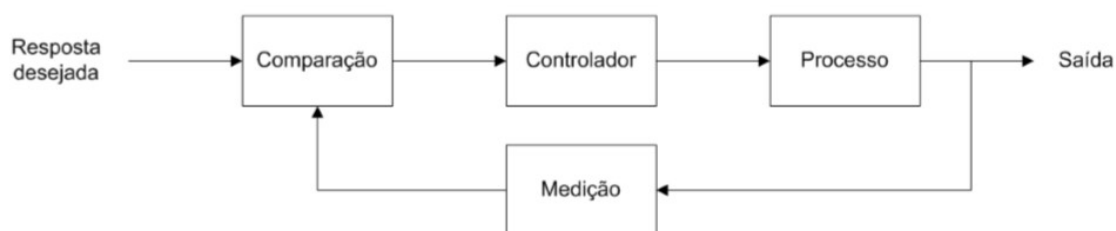


Figura 5 - Sistema de controle em malha fechada.

Fonte: Adaptação do autor (DORF e BISHOP, 2001, p. 2).

Comparando-se os sistemas de controle de malha aberta e malha fechada podemos notar que, em relação à estabilidade, os sistemas de malha aberta são mais fáceis de serem construídos, visto que a estabilidade não é um problema tão significativo. Já em malha fechada, os sistemas podem apresentar uma tendência à correção de erros mais do que necessária, tornando-se assim mais instáveis e apresentando oscilações de amplitude variáveis.

A vantagem do controle em malha fechada se deve ao fato de que esse sistema utiliza um sistema de realimentação que torna o sistema insensível aos distúrbios internos e externos. Com isso, é possível se obter a resposta desejada mesmo com todos os distúrbios presentes nestes sistemas.

Geralmente em sistemas de controle de malha fechada o número de componentes é maior, elevando o custo do projeto, portanto é necessário fazer uma avaliação prévia em relação às necessidades do tipo de controle. Por exemplo, em um sistema onde a relação entre as entradas e saídas são conhecidas e o sistema está pouco propício a distúrbios, é aconselhável utilizar um sistema de malha aberta ou uma combinação dos dois (OGATA, 2010).

3.2 CONTROLADORES PID

Os processos industriais estão sujeitos a diversas interferências que provém da planta em geral. Devido às variações nos processos industriais, modelos matemáticos da planta e dos controladores são muito complexos e difíceis de desenvolver, para atender às especificações de regime transitório e permanente em sistemas de malha fechada.

Uma boa alternativa para suprir as necessidades do controle de processos industriais é a utilização de controladores de três termos, também conhecidos como controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), visto que estes controladores funcionam consideravelmente bem, mesmo quando parametrizados de forma experimental no campo, além disso, alguns controladores mais modernos oferecem a possibilidade de fazer a sintonia ou parametrização automática e *on-line* (OGATA, 2010).

A aplicabilidade dos controladores PID é geral à maioria dos sistemas de controle, mesmo que em algumas situações eles não ofereçam um controle ótimo. Além dos controladores PID em si, são também encontradas derivações do mesmo, como controladores tipo P (proporcional), controladores tipo PI (proporcional e integrativo) e PD (proporcional e derivativo). Estes controladores ainda são os mais utilizados nas indústrias. Essa massiva predominância é devido à sua simplicidade, facilidade de implementação e manutenção (ARAÚJO, 2007).

O controlador PID oferece um termo proporcional, um termo de integração e um termo derivativo (DORF e BISHOP, 2001), sua função de transferência⁶ pode ser dada por:

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

Existem, assim como outros, dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler-Nichols para parametrização dos controladores PID, ou seja, ajustar os valores de K_p (ganho proporcional), T_i (tempo integrativo ou

⁶ Função de transferência: usadas para caracterizar as relações de entrada-saída de componentes ou sistemas que podem ser descritos por equações diferenciais.

ganho integrativo K_i) e T_d (tempo derivativo ou ganho derivativo K_p) para que o sistema responda de forma estável. Estes métodos são muito utilizados principalmente quando os modelos matemáticos dos sistemas são desconhecidos.

No primeiro método observamos a resposta do sistema a uma entrada em degrau unitário. Este método se aplica se a curva de resposta ao sinal de entrada em degrau possuir um aspecto de um S. A partir desta curva, podemos traçar uma linha tangente ao ponto de inflexão e determinar a constante de atraso L e a constante de tempo T , conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6 – Curva de resposta ao degrau.

Fonte: Adaptado do autor (ARAÚJO, 2007, p. 34).

Os valores que Ziegler e Nichols sugerem para K_p , T_i e T_d podem ser calculados de acordo com as fórmulas seguintes apresentadas na tabela 1:

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau (primeiro método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9.T/L$	$L / 0,3$	0
PID	$1,2.T/L$	$2.L$	$0,5.L$

Fonte: Adaptado do autor (OGATA, 2010, p. 524).

No segundo método, definimos um valor de $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Incrementamos o valor de K_p a partir de 0 até um valor crítico K_{cr} , que representa um valor no qual a saída apresenta uma oscilação sustentada pela primeira vez. Caso a saída não exibir nenhuma oscilação sustentada para nenhum valor de K_p , então este método não se aplica. A partir do gráfico gerado da oscilação sustentada (Figura 7), encontramos o valor de K_{cr} e P_{cr} (P_{cr} é medido em segundos).

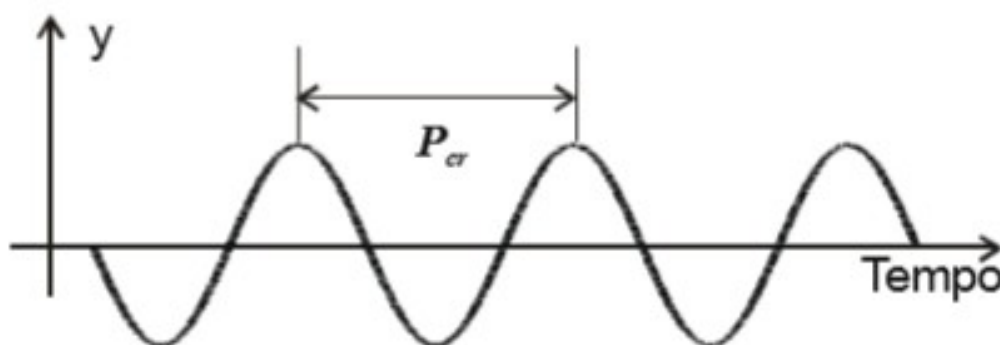


Figura 7 – Oscilação sustentada com período P_{cr} .

Fonte: Adaptado do autor (ARAÚJO, 2007, p. 37).

Conhecidos os valores de K_{cr} e P_{cr} , podemos determinar os valores de K_p , T_i e T_d de acordo com a tabela 2, a seguir:

Tabela 2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} (segundo método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5.K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45.K_{cr}$	$P_{cr}/1,2$	0
PID	$0,6.K_{cr}$	$0,5.P_{cr}$	$0,125.P_{cr}$

Fonte: Adaptado do autor (OGATA, 2010, p. 525).

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Os processos industriais necessitam de controle na fabricação de seus produtos. Na grande maioria desses processos é necessário controlar diversas variáveis que interferem diretamente na qualidade dos produtos, produtividade e muitas vezes na segurança do processo, tais como pressão, nível, temperatura, pH, vazão, umidade, densidade, condutividade, etc. São os instrumentos de medida e controle, os responsáveis por alcançar e manter essas variáveis dentro das especificações exigidas pelo processo.

Cabem às áreas de instrumentação e automação a responsabilidade de manter o processo sobre controle e desenvolver lógicas de programação que englobam todos os processos de uma planta, assim como inspecionar, calibrar e dar manutenção nos instrumentos.

Os instrumentos estão presentes em todos os sistemas de controle, independente se o sistema é de malha de controle aberta ou fechada. Principalmente em sistemas de controle de malha fechada (Figura 5), é preciso manter os valores das variáveis de processo dentro das especificações desejadas, para fazer isso o sistema compara o valor da variável de processo com o valor desejado e toma uma atitude de correção de acordo com o erro encontrado, sem que o operador intervenha.

A instrumentação é a área de estudos responsável pelo trabalho com instrumentos de medição. As principais atividades efetuadas pela instrumentação são instalação, manutenção, aferição e calibração dos equipamentos. Este segmento tem por objetivo assegurar a precisão e confiabilidade exigida no processo produtivo, procurando garantir a qualidade de produtos e serviços.

Para que seja feito o controle do processo são necessários sensores em determinados locais para a entrada de informações no sistema. Existem no “campo” sensores do tipo transmissor e do tipo chave. O primeiro é geralmente usado para leituras contínuas da variável em uma faixa de valores pré-selecionado. Já o segundo é usado para medições em um valor fixo da variável e é muito encontrado para acionar alarmes e controle em pontos fixos,

principalmente para controle ON-OFF. Sua saída permite apenas dois estados, ativado ou não.

Os dispositivos e instrumentos utilizados na instrumentação podem ser classificados de acordo com a função que desempenham no processo (PESSA, 2006).

- a) Indicador: instrumento que possui uma escala ou faixa de medida, responsável por medir ou mensurar uma determinada variável. Podem ser classificados como analógicos ou digitais. Exemplos: Manômetro, Termômetro, etc.
- b) Transmissor: além de medir uma variável do processo, através de um elemento primário, também possui um sinal de saída (eletrônico ou pneumático) capaz de transmitir este valor para um segundo instrumento ou controlador. Exemplos: Transmissor de nível, Transmissor de vazão, etc.
- c) Transdutor: um transdutor recebe um sinal de entrada de uma natureza física e, se necessário, modifica ou converte esta informação para outra natureza, enviando um sinal de saída correspondente àquele valor. Pode ser um elemento primário, um transmissor ou outro dispositivo. Exemplo: Conversor de sinal de corrente para pressão.
- d) Registrador: instrumento que registra as variáveis medidas através de gráficos ou traço contínuo.
- e) Controlador: instrumento que recebe um sinal de entrada diretamente ou através de um transmissor ou conversor, compara com um valor desejado pré-determinado e fornece um sinal de saída a fim de manter a variável controlada em um valor específico ou entre valores toleráveis pelo processo. Exemplo: PLC.

- f) Elemento final de controle: é responsável por modificar diretamente o valor de uma variável manipulada em uma malha de controle. Exemplos: válvula, atuador, etc.

Além do conceito de instrumentos, existem também outros conceitos importantes que devem ser considerados no ramo da instrumentação:

- Repetitividade: grau de concordância entre os resultados de medições de um mesmo mensurado, realizadas sobre as mesmas condições de medida.
- Exatidão: aptidão de um instrumento de medição para dar uma resposta condizente com o valor verdadeiro.
- Erro: É a diferença entre o valor lido pelo medidor ou transmissor e o valor real de uma variável.
- Range ou Faixa de Medição: é o conjunto de valores que estão compreendidos dentro de um limite inferior e superior, no qual um instrumento é capaz de medir ou transmitir. Exemplo: Conversor de corrente para pressão – trabalha na faixa de 4 a 20 mA e 3 a 15 PSI.
- SPAN ou Alcance: É a diferença entre o limite superior e o limite inferior do *range* de um instrumento. Exemplo: termômetro com *range* entre -100 a 200°C, seu *span* é de 300°C.

3.4 AUTOMAÇÃO

Com o avanço da tecnologia, grande parte dos processos industriais passou a ser controlado por equipamentos eletrônicos, nos quais existe uma grande flexibilidade e facilidade para efetuar mudanças na lógica de controle, uma maior estruturação e organização dos elementos do processo, além de um maior rendimento nas operações efetuadas. A automação, que se aplica neste

contexto, é um ramo de ciência específico no estudo desse segmento tecnológico que se encarrega de tornar os processos industriais automáticos, buscando rendimento e uma menor intervenção humana na linha de produção.

3.4.1 CLP

Os Controladores Lógicos Industriais, conhecidos como CLP ou PLC (*Programmable Logic Controller*), utilizados no CMT são da linha *Modicon Quantum*, da marca *Schneider Automation Inc*, e junto com algumas remotas (módulos de comunicação de entrada e saída) de I/O modelos P451 e P421 da antiga série B200 da *Modicon*, são os responsáveis por controlar todas as plantas.

O CLP em questão possui diversos módulos, com funções específicas para cada aplicação, que são conectados a uma placa chamada de *backplane* em que, além de dar suporte mecânico para os módulos, é o local onde são feitas as ligações elétricas entre eles. Os locais do *backplane* onde são conectados os módulos são chamados *slots*, e cada *backplane* pode possuir 2, 3, 4, 6, 10 ou 16 *slots*.

Os módulos utilizados pela linha Quantum possuem conectores e formas iguais, diferindo apenas em seu circuito elétrico, isto é, nas funções que executam nos contatos externos e na disposição dos LEDs indicadores.

As remotas da série B200 também possuem cartões que se diferenciam de acordo com suas funções. Uma diferença notável com relação à linha Quantum é que cada posição possui um endereçamento e, se posições distintas tiverem o mesmo endereço, elas terão o mesmo valor lógico.

Cada *drop* (*backplanes* que possuem CPU) deve possuir um módulo de alimentação, cuja função é fornecer energia para o restante do circuito, o modelo utilizado na linha *Quantum* é o 140 CPS 11X 00 que converte 115/230 Vac (tensão alternada) aplicados na entrada para 5.1Vdc (tensão contínua), já nos da série B200 há uma fonte de alimentação separada que fica acoplada ao restante do circuito.

O controlador é o módulo que faz o processamento dos dados, no CMT, são utilizados apenas os modelos 140 CPU XXX XX da linha *Quantum* que

variam em quantidade de memória e número de portas *Modbus Plus (RS-485)* que podem ser uma ou duas, além de possuir a porta *Modbus (RS-232)* que está disponível em todos os modelos.

A porta *Modbus*, que é um protocolo aberto, pode ser utilizada para comunicação com um computador, por exemplo, e a *Modbus Plus*, padrão desenvolvido pela Schneider é usado para comunicação com outras CPUs.

Na parte traseira deste módulo existem duas chaves selecionadoras, usadas para configurar o endereço da porta *Modbus* e o nó da *Modbus Plus*, a faixa de valores permitido vai de 1 a 64.

Devido ao fato de sua memória ser do tipo RAM (*Random Access Memory*), ou seja, mantém gravados os dados apenas enquanto estiver energizada, ela necessita de uma alimentação constante. Por esse motivo a CPU possui uma ou duas baterias ligadas a ela para que as informações não sejam perdidas em caso de falta de alimentação, por exemplo. A Figura 8 ilustra um rack de testes com um PLC da linha Quantum.



Figura 8 – Rack de testes com PLC da linha Quantum.

Fonte: Própria autoria.

Tipos de comunicação:

Comunicação *Ethernet*: Este módulo de comunicação, disponível também apenas na linha *Quantum*, é utilizado para interligar a CPU à rede industrial, o modelo utilizado é o 140 NOE 771 11 e nele a comunicação pode ser feita por fibra óptica (Base FX) ou cabo de “par trançado” (Base-T). Para que se processe a comunicação é necessário um endereço IP (*Internet Protocol*) para identificação do equipamento junto à rede que, no CMT, inicia-se com 10.0.0.XX.

Comunicação *Modbus Plus*: Esta comunicação é feita utilizando portas da própria CPU ou utilizando módulos específicos, os 140 NOM 21X 00.

Comunicação *Profibus DP*: Este módulo é utilizado no CMT no *drop* da CPU 15 para comunicação com relés inteligentes usados na área do CG 16 e rebitagem e também no *drop* da CPU da mina. O modelo utilizado é o 140 CRP 811 XX.

Comunicação com Remotas: as entradas e saídas são distribuídas em diversos centros de carga por meio de remotas, elas ficam em constante comunicação com as CPUs correspondentes, o que é feito por meio dos módulos 140 CRP 931 XX e 140 CRA 931 XX que são, respectivamente, o principal, que fica ligado ao *backplane* da CPU, e os *drops*, que ficam no *backplane* de cada remota.

3.4.2 PROGRAMAÇÃO

A programação deste CLP é feita no programa *Concept Programming Unit* que disponibiliza diversas linguagens de programação, contudo, no CMT utiliza-se em maior parte apenas a linguagem gráfica *Ladder Logic 984* (LL 984). Os principais componentes *ladder* utilizados na programação são blocos de lógica simples.

Há também instruções especiais, contidas em blocos e que podem ocupar vários registradores, eles executam de funções simples como somar até funções mais complexas como controles PID e muitos outros.

Um programa é subdividido em grupos, estes em seções e estas por fim em *networks*. A leitura dos dados nos *networks* pelo processador é feita sempre de cima para baixo da esquerda para a direita, podendo, entretanto, saltar para uma sub-rotina.

Existe um endereçamento da memória segundo seu tipo, são eles:

0xxxxx – Ocupa um único bit / Leitura e escrita / Saída digital.

1xxxxx – Ocupa um único bit / Leitura / Entrada digital.

3xxxxx – Registrador de 16 bits / Leitura / Entrada analógica.

4xxxxx – Registrador de 16 bits / Leitura e Escrita / Saída analógica.

Na caixa *Reference Selection* (Figura 9) pode-se selecionar qual o tipo de memória que será mostrado. O valor mostrado em cada célula da tabela indica o tipo de memória.

The screenshot shows a window titled "Used Reference Display" with the following components:

- Reference Selection:** Radio buttons for 0x, 1x, 3x, and 4x. The 0x option is selected.
- State RAM Access Types to Show:** Radio buttons for R/W, Read, and Write. The R/W option is selected.
- Legend:** A list of memory types with checkboxes:
 - LL 984LL
 - IEC IEC prog
 - IO I/O Map
 - PC Peer Cop
 - CFG Cfg Specials
 - SEG Seg Sched
 - IOS I/O Scanner
 - DP Data Protect
 - VAR Unused Var
 - HS Hot Standby
 - [r,w] Read/Write
 - <Red> Multiple Write
- Table:** A grid with 11 columns (0-8) and 17 rows (00000-00150). Each cell contains a memory access type code like LL[rw].IO or IO.
- Buttons:** "Close" and "Help" buttons at the bottom.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
00000		LL[rw].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	IO	LL[w].IO	IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00010	LL[rw].IO	LL[w].IO	IO	IO	IO	IO	IO	LL[w].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO
00020	LL[rw].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO	LL[w].IO	IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00030	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO
00040	IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO
00050	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	IO	LL[w].IO	IO	IO	IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00060	IO	LL[w].IO	IO	IO	LL[rw].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00070	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	IO	IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00080	IO	LL[w].IO	LL[w].IO	IO	IO	IO	LL[rw].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO
00090	IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[r].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00100	LL[w].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO
00110	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[rw].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00120	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00130	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00140	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[w].IO	LL[rw].IO
00150	LL[w].IO	LL[w].IO	IO	LL[w].IO	IO	LL[w].IO	IO	LL[w].IO	IO	IO

Figura 9 – Quadro de Referências Utilizadas.
Fonte: Vale Fertilizantes S.A..

A Figura 10 mostra os módulos usados em cada *drop*, onde também são mostrados e configurados os endereços dos registradores de I/O.

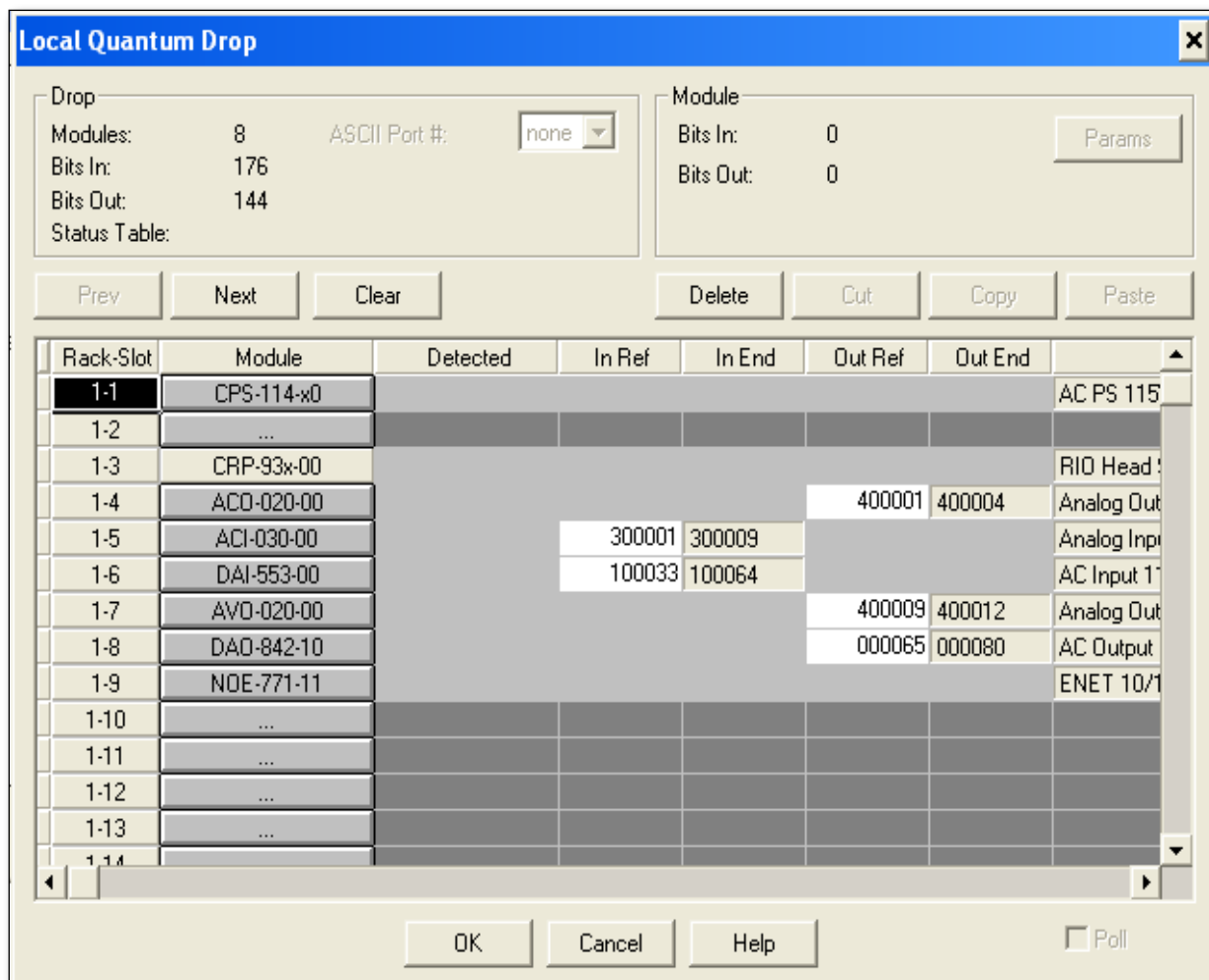


Figura 10 – Módulos utilizados em um drop.

Fonte: Vale Fertilizantes S.A., 2013.

Além dos quadros de verificação de endereço de memória e disposição dos módulos em cada *drop*, também podemos consultar quais as variáveis que já foram declaradas na programação. A Figura 11 ilustra o quadro de variáveis declaradas no programa.

Variable Editor

Type

Variables Constants

Search/Paste

Search/Replace

	Exp	Variable Name	Data Type	Address	InitValue	Use
1959	<input type="checkbox"/>	AM1_PD216301	INT	407525		0
1960	<input type="checkbox"/>	PDM_216301	INT	407535		4
1961	<input type="checkbox"/>	MEM_PDM216301	INT	407536		2
1962	<input type="checkbox"/>	MPIT_212803	INT	407551		2
1963	<input type="checkbox"/>	MSTR2A_TOUT	INT	407867		1
1964	<input type="checkbox"/>	MSTR1A_TOUT	INT	407868		1
1965	<input type="checkbox"/>	MSTR2A_CONFIG	INT	407869		1
1966	<input type="checkbox"/>	MSTR1B_TOUT	INT	407881		1
1967	<input type="checkbox"/>	MSTR1A_CONFIG	INT	407882		1
1968	<input type="checkbox"/>	MSTR2B_TOUT	INT	407896		1
1969	<input type="checkbox"/>	MSTR3_TOUT	INT	407897		1
1970	<input type="checkbox"/>	MSTR1A_DADOS	INT	407900		2
1971	<input type="checkbox"/>	MSTR2A_DADOS	INT	407920		1
1972	<input type="checkbox"/>					
1973	<input type="checkbox"/>					

OK Cancel Help

Figura 11 – Quadro de variáveis declaradas.

Fonte: Vale Fertilizantes S.A., 2013.

3.4.3 SUPERVISÓRIO

Grande parte do processo industrial é observada e controlada remotamente pelos operadores por meio de sistemas especiais interligados aos PLCs, esses sistemas são chamados de supervisórios. Neles o programador define as ligações internas e interface do programa com o operador, por meio de blocos de gráficos, animações, botões, janelas etc. Geralmente o processo é subdividido em sinóticos para uma melhor visualização, possuindo outras de funções diversas, como alarmes, gráficos e etc.

Existem dois sistemas em operação no CMT para supervisão do processo, são eles o Wizcon e o FactoryLink.

O primeiro é usado para supervisão das linhas do mineroduto, da britagem primária e subestação. Já o outro é responsável pela usina de concentração e área 62 (Barragem de rejeitos).

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 PROCESSO PRÉ-EXISTENTE

Um dos processos de beneficiamento de minérios realizado no Complexo Mineral de Tapira é o processo de classificação mineral utilizando hidrociclones. Na bateria de ciclones TA-1413116 este processo é realizado com o produto final, sendo que após esta etapa o produto já está praticamente pronto para ser bombeado para o cliente da empresa através de um mineroduto.

Para atender às especificações do mineroduto, o minério deve possuir uma granulometria de 4 a 8% retido na malha 100#. Nesta malha as partículas maiores que 0,148 mm ficam retidas. O objetivo desta bateria é classificar a polpa de forma que o produto obtido no *Overflow* dos ciclones possua uma granulometria que atenda ao mineroduto. A fim de monitorar a granulometria do material, são feitas amostragens de uma em uma hora na saída do *Overflow* resultante dos hidrociclones, e de duas em duas horas são feitas amostragens nos quatro tanques que armazenam o produto final que vai ser bombeado pelo mineroduto.

A bateria TA-1413116 possui 10 ciclones independentes, sendo que em geral apenas a metade dos ciclones opera ao mesmo tempo. Na parte superior da bateria está localizado um distribuidor, que tem o objetivo de direcionar igualmente a polpa em todos os ciclones que estiverem em operação. Cada hidrociclone possui em sua linha de montagem uma válvula “on-off”, estas válvulas proporcionam o estado de operação ou stand-by dos mesmos. Um operador, da sala de controle, é capaz alternar a abertura e fechamento de até quatro dessas válvulas, pois elas possuem comando elétrico e acionamento pneumático e estão conectadas ao supervisor.

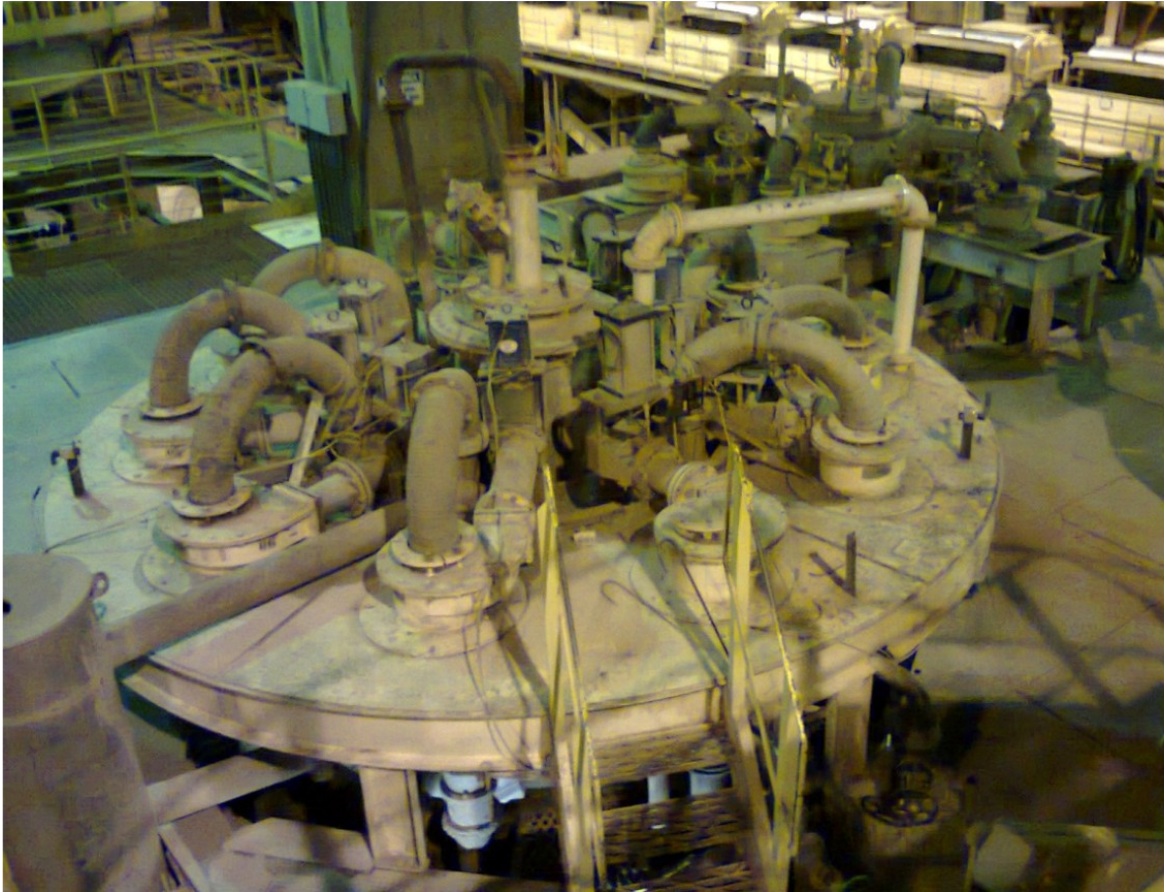


Figura 12 – Bateria de hidrociclones TA-1413116.

Fonte: Própria autoria.

Para monitorar a pressão dentro do distribuidor da bateria, e conseqüentemente de cada hidrociclone em operação, é utilizado um transmissor de pressão (PIT), que trabalha com um range de 0 – 4 Kgf/cm² de pressão e também possui indicação no supervisório da sala de controle.



Figura 13 - Transmissor de pressão instalado no distribuidor da bateria TA-1413116.

Fonte: Própria autoria.

A Figura 14 ilustra o processo de remoagem em um sistema supervisório, onde estão presentes todos os equipamentos integrantes deste processo, tais como a bomba (14-2304) que alimenta a bateria de hidrociclones, a caixa da bomba, as válvulas que podem ser atuadas da sala de controle referentes a cada hidrociclone. Também são representados os dois moinhos responsáveis pela moagem do material que sai do *underflow* dos ciclones, a caixa e a bomba (14-2381) que alimenta a bateria de ciclones TA-1413117, funcionando como reserva da bateria TA-1413116. Finalmente, todas as tubulações que representam a origem e o destino de todo processo de remoagem.

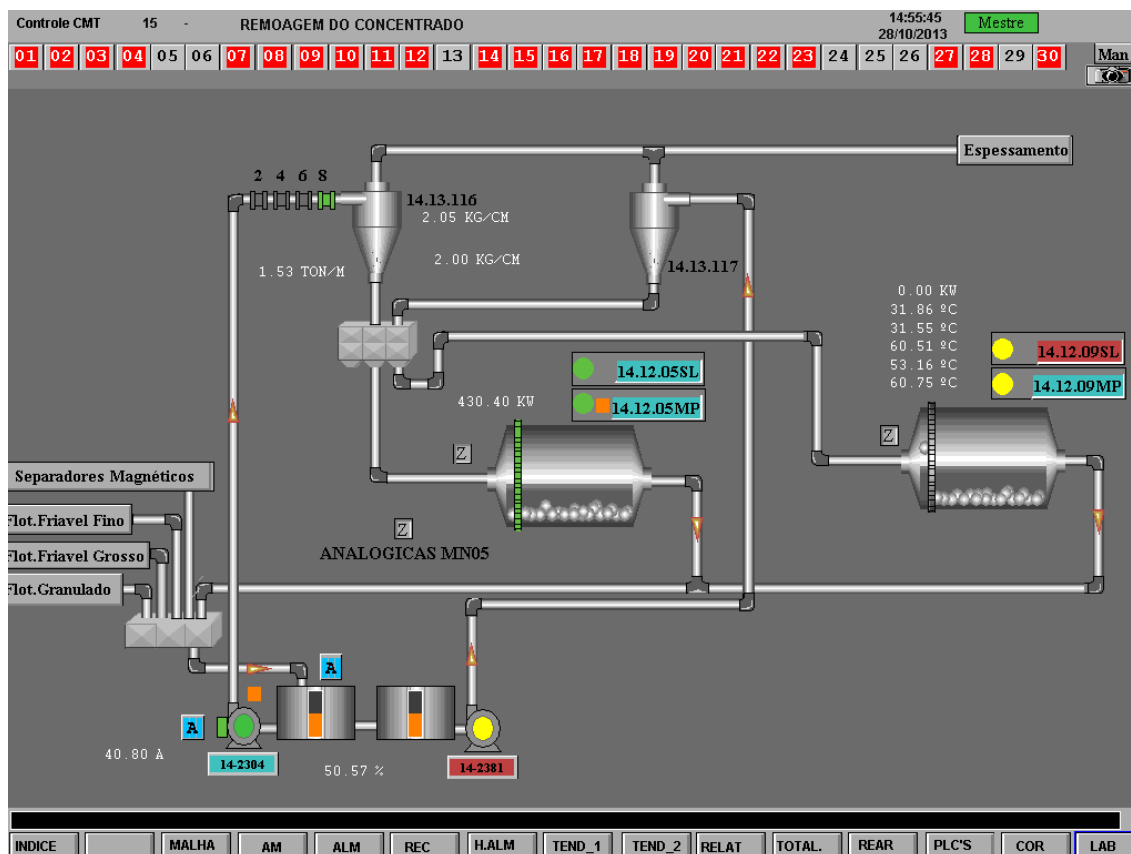


Figura 14 – Sistema Supervisório – Processo de classificação bateria TA-1413116.

Fonte: Própria autoria.

Neste processo, a densidade da caixa da bomba que alimenta a bateria é controlada automaticamente através de uma válvula de adição de água, localizada logo acima da caixa. Esta mesma caixa ainda recebe material do processo de separação magnética e dos processos de flotação. Como existe a possibilidade da válvula de adição de água fechar totalmente para atender ao *set-point* de densidade pedido pelos operadores, esta válvula foi limitada em no mínimo 20% de abertura, para evitar aterramento da bomba. O controle de densidade utilizado neste processo é do tipo PID. Na figura a seguir, este controle é ilustrado, mostrando a saída da válvula de adição de água e o pedido de *set-point*.

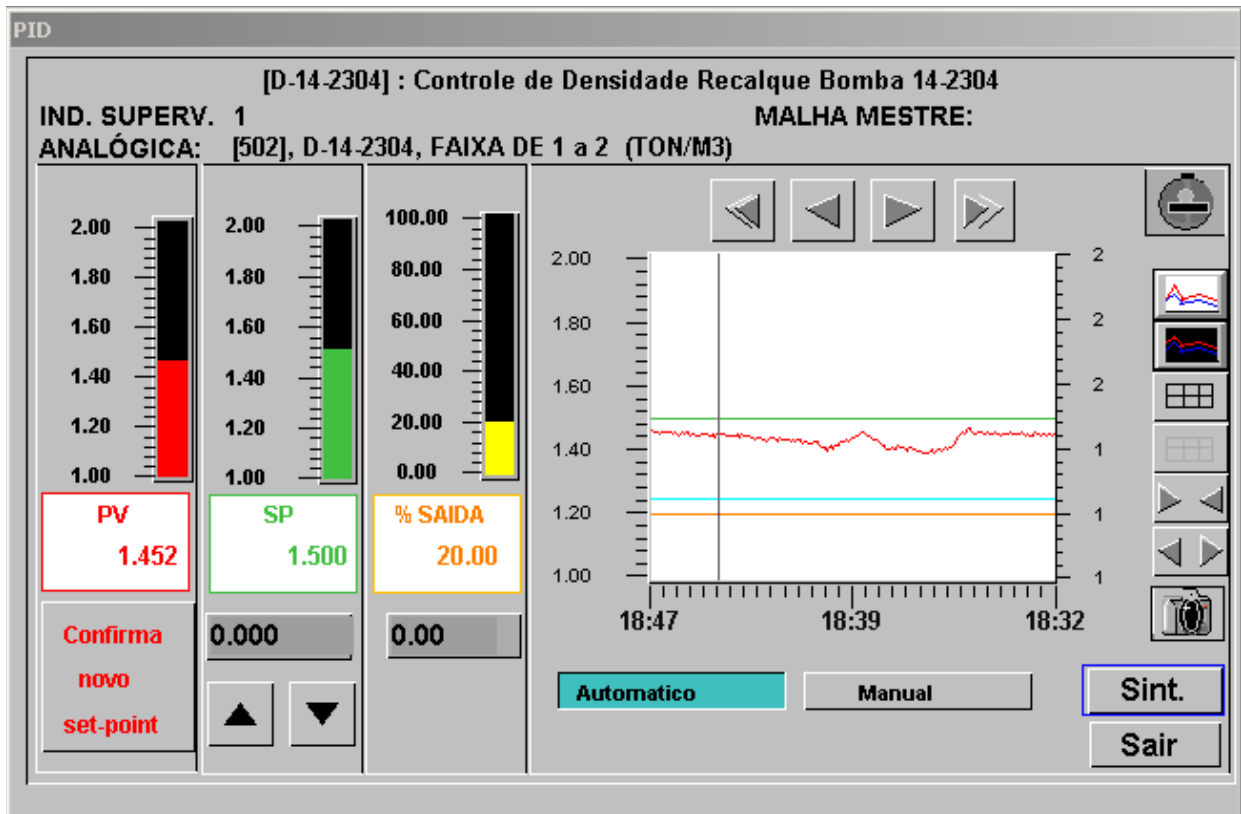


Figura 15 – Controle de densidade da polpa que alimenta a bateria TA-1413116.

Fonte: Própria autoria.

O nível da caixa é controlado por uma bomba que varia a velocidade de acordo com este nível, para atender ao *set-point* desejado, geralmente trabalhando com um valor de 50% de nível. Sendo assim, com a variação da velocidade da bomba, a pressão de alimentação da bateria também varia. Este controle também é um controle PID.

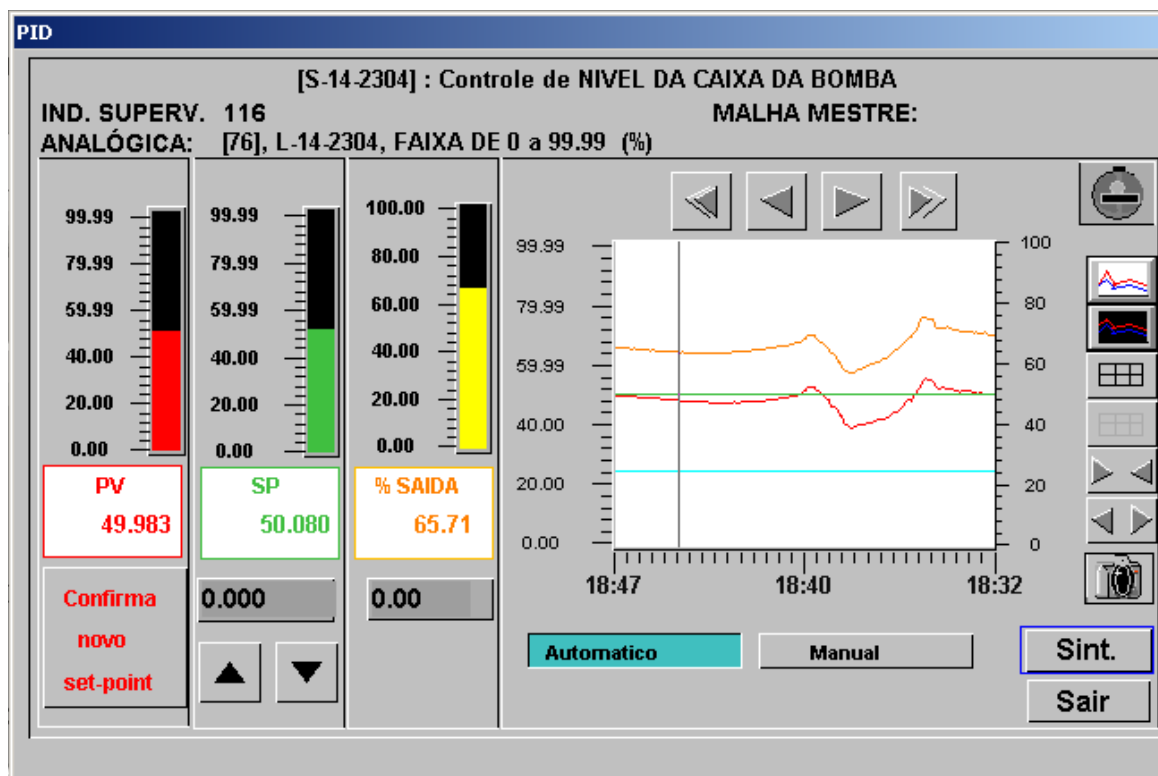


Figura 16 – Controle PID do nível da caixa que alimenta a bateria TA-1413116.

Fonte: Própria autoria.

Estudos realizados, com base em análise de gráficos de uma planilha de resultados de amostragens do produto, revelaram que o processo de classificação mineral realizado pela bateria TA-1413116 estava sem controle da pressão de alimentação dos ciclones e sem controle da granulometria do produto final, cuja origem é o *Overflow* dos ciclones. As figuras 17, 18 e 19 a seguir, mostram a variação da pressão e granulometria referentes a algumas datas antes da implantação deste trabalho:

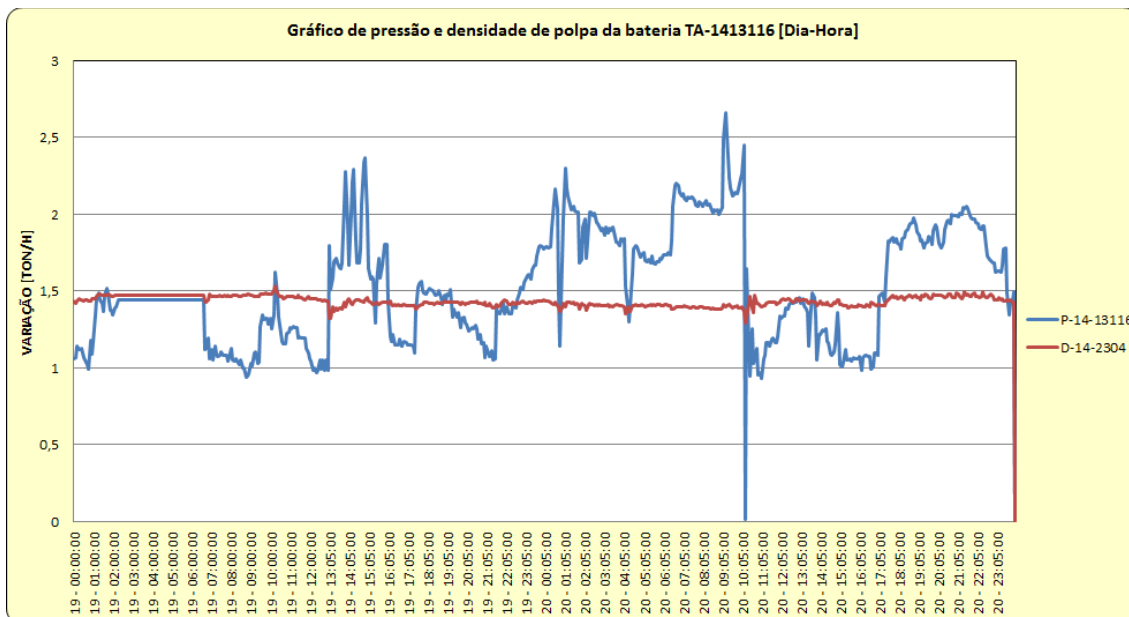


Figura 17 – Gráfico da pressão [Kgf/cm²] (azul) e densidade de polpa [g/cm³] (vermelho) da bateria TA-1413116 referente aos dias 19 e 20 de Setembro de 2013.

Fonte: Vale Fertilizantes S.A., 2013.

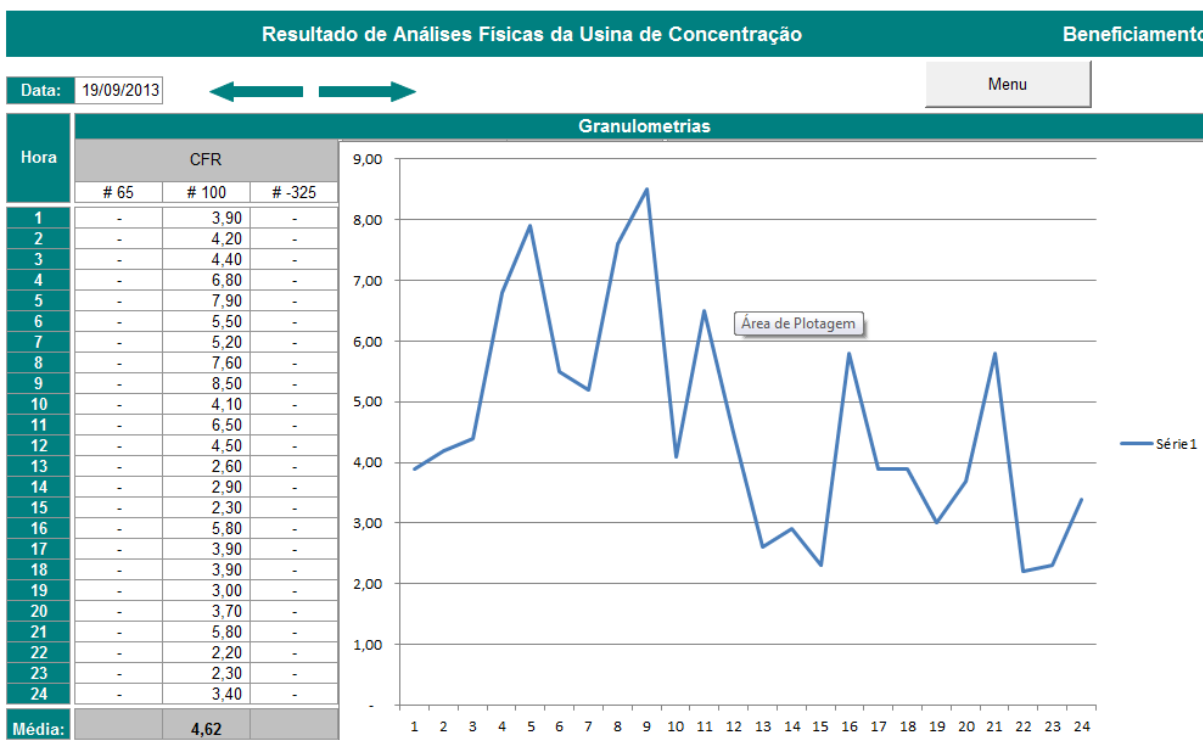


Figura 18 – Granulometria bateria TA-1413116 – 19 de Setembro de 2013.

Fonte: Própria autoria.

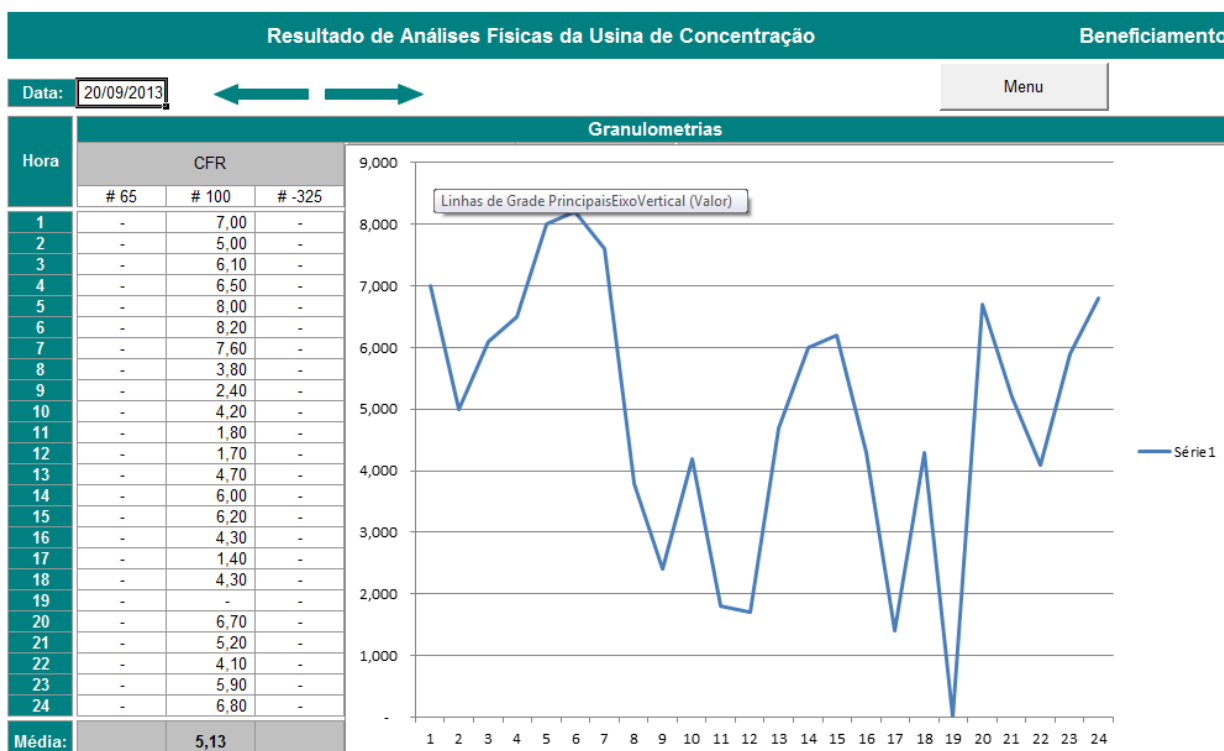


Figura 19 – Granulometria bateria TA-1413116 – 20 de Setembro de 2013.

Fonte: Própria autoria.

Conforme o APÊNDICE A, percebe-se que encontramos uma grande variação de pressão e granulometria em datas anteriores, neste caso, referentes ao mês de Agosto de 2013.

A tentativa de controle do processo era feita de forma manual por cada operador distinto, que estava presente na sala de controle da usina de beneficiamento. Os operadores realizavam manobras para tentar ajustar a granulometria final do produto. As manobras mais frequentes utilizadas pelos operadores eram:

- Abrir/Fechar as válvulas que alimentam os ciclones de forma independente, permitindo ou não a passagem do fluxo que sai do distribuidor para cada ciclone. Isso proporciona um aumento ou queda de pressão nos demais ciclones que estão abertos e em operação.
- Operar com um ou outro moinho de bolas de dimensões diferentes, ou com os dois ao mesmo tempo. Esta manobra faz com que a

granulometria do material, que sai pelo *Underflow* da bateria e volta para a caixa de alimentação da mesma, seja alterada.

- Abrir/Fechar a válvula de adição de água na caixa da bomba que alimenta a bateria. Com isso, a densidade da polpa é alterada e consequentemente sua porcentagem de sólidos.

Todas estas manobras afetam o resultado do produto final, porém, como cada operador atua de forma diferente, nenhum procedimento padrão para a sequência de manobras é seguido, sendo assim o resultado varia constantemente. Além disso, o processo de classificação na bateria TA-1413116 sofre várias interferências devido aos seguintes fatores:

- a) Tempo de residência no moinho: dependendo da carga circulante, do número de ciclones abertos ou operando, da vazão de água de alimentação e do volume de material que está sendo beneficiado na usina, o tempo de residência do material dentro do moinho é alterado, isto causa uma mudança na granulometria de alimentação da bateria e consequentemente do corte do material. Quanto maior o tempo de residência no moinho, menor será o tamanho das partículas.
- b) Eficiência de moagem: a eficiência de moagem altera o tamanho das partículas que saem dos moinhos, pois além do tempo de residência do material dentro do moinho, também devemos considerar outros fatores que interferem na eficiência do mesmo, assim como, a quantidade de corpos moedores (bolas), desgaste das bolas, velocidade dos moinhos e porcentagem de sólidos da polpa alimentada.
- c) Processo de flotação: o processo de flotação é instável em relação ao volume de produção, variação da densidade do material flotado, vazão da água que carrega o flotado e a eficiência do processo em si. Com todas essas variações no processo de flotação, tanto a granulometria quanto a densidade da polpa que está na caixa da bomba da bateria de ciclones, sofrem alterações constantemente.

- d) Processo de separação magnética: antes de ir para a caixa da bomba, parte do material também passa por um separador magnético de alta intensidade SMAI, porém a eficiência deste processo é outra variável que altera a densidade da polpa.

Se o produto final, que vai ser bombeado pelo mineroduto, possuir granulometria alta (maior que 8% retido na malha 100#), existe o risco de entupimento do mineroduto por aterramento. Caso o tamanho das partículas for muito reduzido (abaixo de 4% retido na malha 100#), ocorre encrustamento de material nas paredes dos tubos do mineroduto, levando o mesmo à queda de pressão no fluxo bombeado, podendo também, ocasionar o entupimento do mesmo.

Em consequência da variação da granulometria na polpa que vai para os tanques do mineroduto, a empresa adotou um sistema denominado blendagem para manter os tanques dentro das especificações granulométricas exigidas. Este sistema consiste em direcionar a polpa para os tanques que alimentam o mineroduto, de forma a compensar a variação de produto em cada tanque, por exemplo, quando um tanque está carregado com material fino até a metade do seu nível, é esperado obter uma polpa mais grossa no processo para que seja misturada naquele tanque, enquanto isso, o material que estiver mais fino é jogado em outro tanque, também esperando por um produto mais grosso. Além de considerar a granulometria do material nos tanques, também é levado em conta o teor do produto em cada tanque, levando ou não à necessidade de fazer uma blendagem.

Mesmo utilizando a blendagem, ainda ocorrem certos eventos em que um tanque fica cheio de material fora de especificação granulométrica ou do teor desejado, quando isso ocorre o material daquele tanque é bombeado para um reservatório de maior capacidade, chamado de *Pound*, esperando outra oportunidade para ser aproveitado. Com isso, são gerados custos de energia elétrica e mecânica no bombeamento e estocagem do produto fora de especificação, além do tempo de operação gasto neste.

4.2 MELHORIA DO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO

Constatamos que, mesmo com todas as interferências, às quais o processo de classificação está sujeito, todas essas variações alteram principalmente a porcentagem de sólidos, a pressão e a granulometria da polpa de alimentação dos hidrociclones.

Para alcançar o controle de pressão nos hidrociclones, instalamos um posicionador em apenas uma das válvulas on-off que alimenta um dos hidrociclones, com isso conseguimos fazer esta válvula modular sua abertura de 0 a 100 por cento proporcionalmente a um sinal de entrada de 4 a 20 mA, transformando essa em uma válvula de controle de pressão (PCV). A abertura da válvula varia de acordo com a diferença entre a pressão medida pelo transmissor de pressão, instalado no alimentador da bateria, e o valor de pressão pré-estabelecido em um *set-point*. A Figura 20 ilustra a válvula com o posicionador instalado.

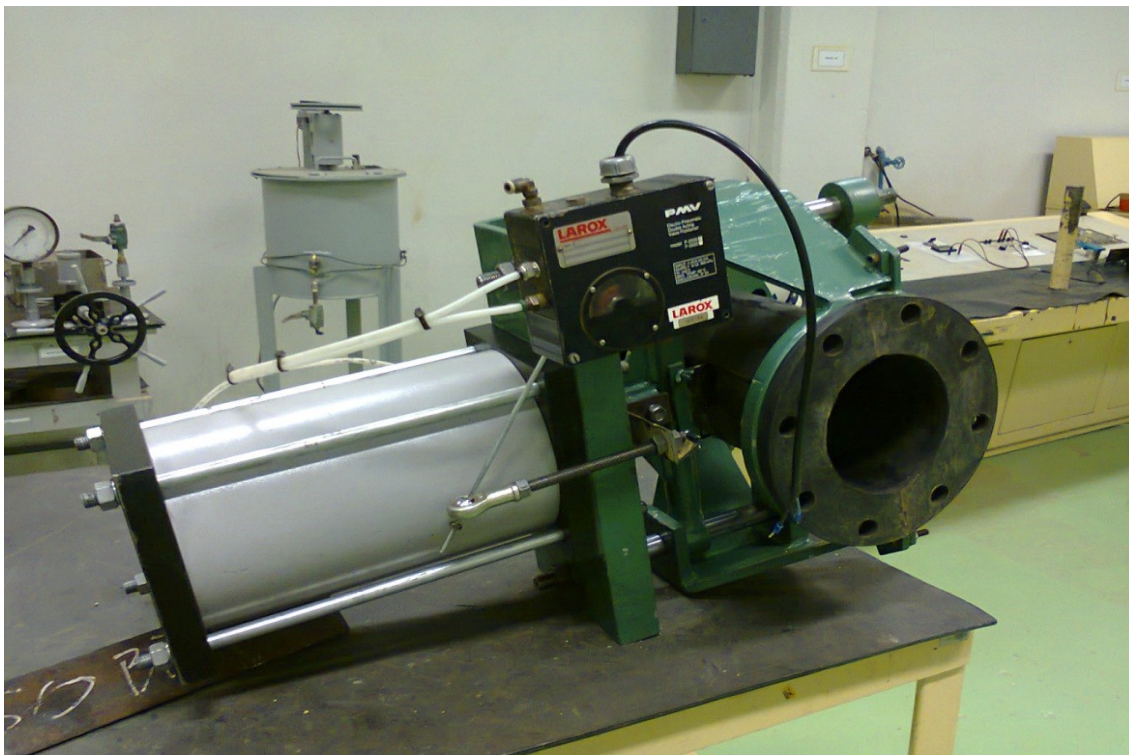


Figura 20 – Válvula “Mangote” com acionamento pneumático de dupla ação e posicionador para controle proporcional.

Fonte: Própria autoria.

Uma abertura modulada da válvula, por exemplo, em 30 por cento, causa queda de pressão na alimentação do hidrociclone, ocasionando um corte instável. Para que isso não ocorra, retiramos o hidrociclone correspondente a esta válvula, fazendo com que o percurso que vai para o *Over* seja interrompido, restando apenas o caminho que leva o material para o *Under*. Desta forma, a PCV controla a pressão do distribuidor através de um duto de escape, que leva em média cinco por cento do material, quando a bateria opera em condições típicas, de volta para o moinho. A Figura 21 ilustra as tubulações que permaneceram após a retirada do hidrociclone.



Figura 21 – Hidrociclone modificado, retirados APEX e Vórtex e flangeado o Overflow.

Fonte: Própria autoria.

O controle da válvula instalada é feito por um PLC que, através de um controle PID e sua respectiva programação em *Ladder Logic 984*, efetua em conjunto com outras válvulas solenoides “on-off” este controle de forma satisfatória. Para verificar a lógica de programação e o fluxograma operacional do controle de pressão do processo, consultar o APENDICE B. A lógica de programação foi desenvolvida de forma que, a PCV trabalhe sensivelmente à variação da pressão, porém sem danificá-la. Esta válvula consegue modular até 0,20 Kgf/cm² de pressão, sendo assim após sua abertura ou fechamento total, as outras válvulas solenoides atuarão. Podemos verificar na programação que as válvulas solenoides atuam de acordo com um diferencial de pressão.

Para obter um controle mais eficaz e ao mesmo tempo mais sensível, a PCV foi limitada em no máximo 60% de abertura, pois trabalhando dentro desta faixa a resposta do sistema é mais satisfatória.

Os parâmetros de ganho proporcional, integral e derivativo foram ajustados de forma empírica, sendo o derivativo igual à zero, se tornando um controle apenas proporcional integral. Esse ajuste de parâmetros de forma empírica foi feito porque devemos levar em consideração o desgaste mecânico dos componentes do sistema, ou seja, um sistema que atua de forma muito rápida pode, mesmo controlando o processo, danificar a válvula de controle.

As imagens a seguir ilustram o controle PID da válvula de controle de pressão (Figura 22) que foi instalada, assim como os parâmetros ajustados (Figura 23), ambos no sistema supervisor.

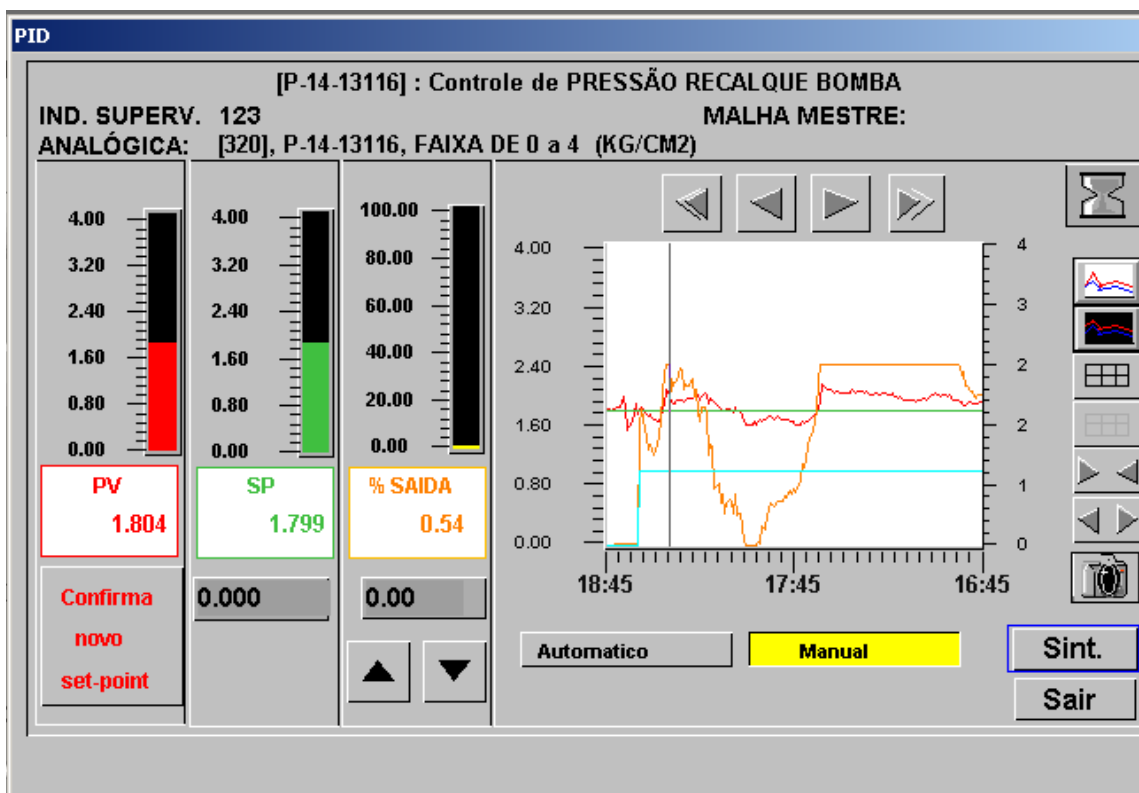


Figura 22 – Resposta da PCV à variação da pressão.

Fonte: Própria autoria.

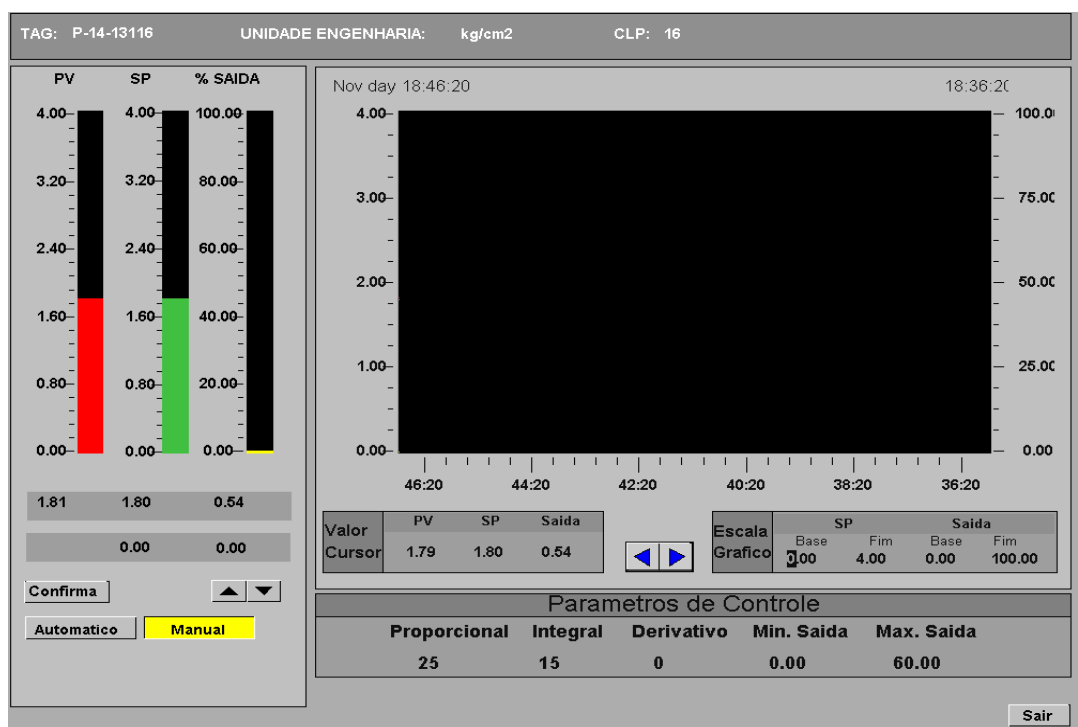


Figura 23 – Ajuste de parâmetros da PCV no supervisório.

Fonte: Própria autoria.

4.2.1 RESULTADOS OBTIDOS

Após a instalação da PCV observamos que, apesar do gráfico de pressão ainda apresentar oscilações, estas oscilações passaram a variar em uma faixa menor de valores.

A granulometria do produto final ainda continuou apresentando oscilações, esses resultados foram obtidos através de amostragens efetuadas pela equipe do laboratório químico.

As figuras 24, 25 e 26 mostram os valores correspondentes à granulometria e pressão de entrada, nos dias 01 e 02 de Novembro, após a implantação da válvula de controle de pressão, e após passar o controle da densidade da polpa de alimentação para automático.

Os primeiros testes com o sistema funcionando em automático foram iniciados dia 01 de Outubro de 2013, passando a operar sem intervenções a partir do dia 02 de Outubro de 2013.

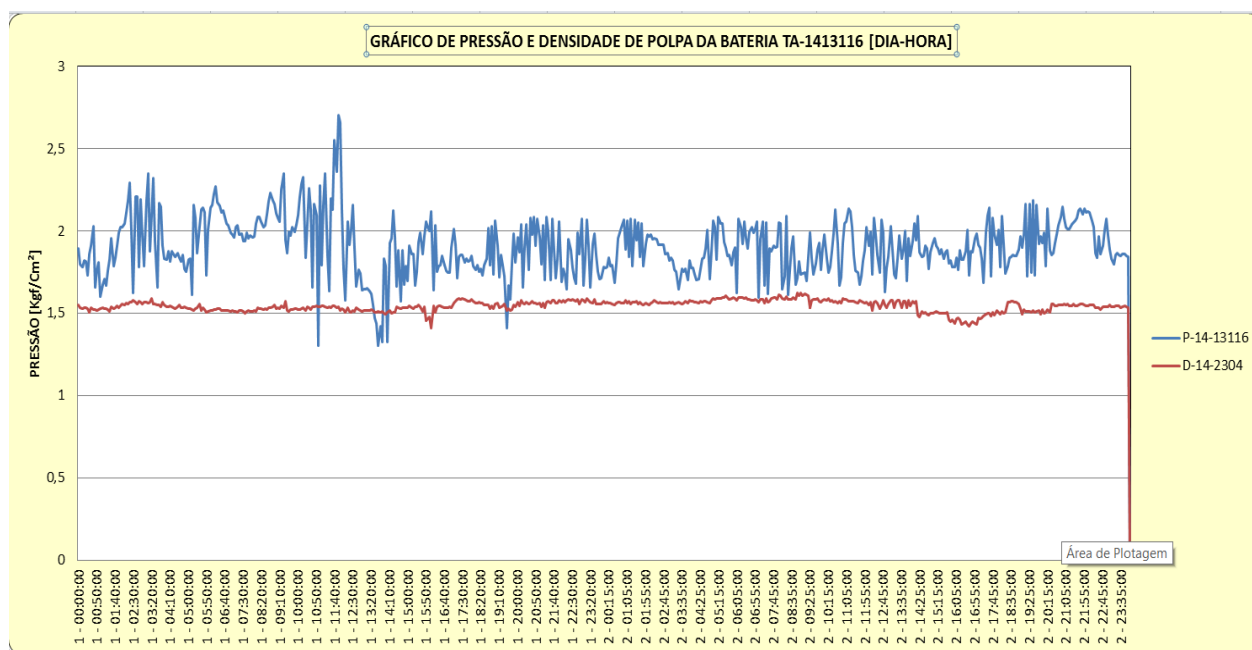


Figura 24 – Gráfico da pressão [Kgf/cm²] (azul) e densidade de polpa [g/cm³] (vermelho) da bateria TA-1413116 referente aos dias 01 e 02 de Outubro de 2013.

Fonte: Própria autoria.

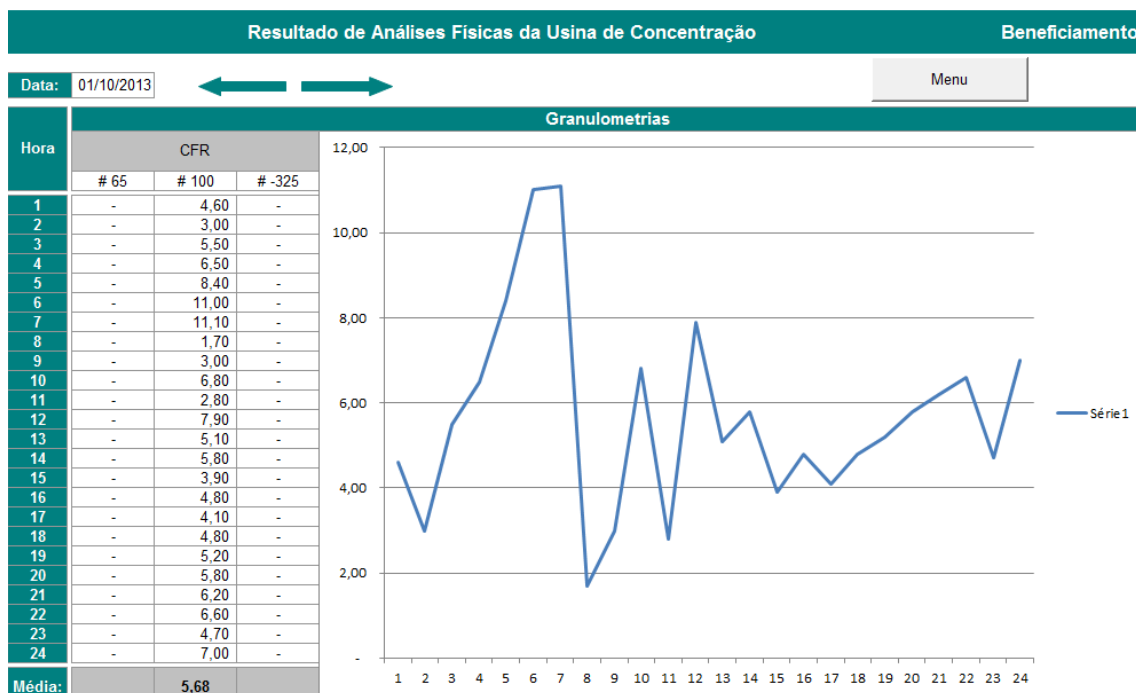


Figura 25 – Granulometria bateria TA-1413116 – 01 de Outubro de 2013.

Fonte: Própria autoria.

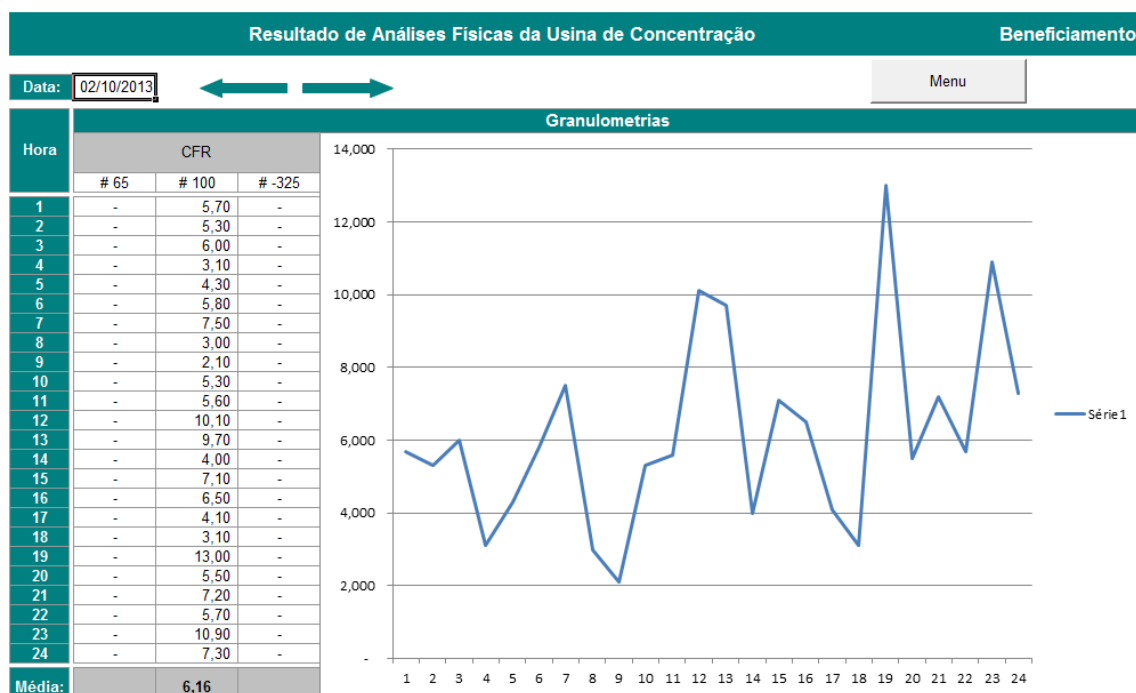


Figura 26 – Granulometria bateria TA-1413116 – 02 de Outubro de 2013.

Fonte: Própria autoria.

4.2.2 VANTAGENS

- Controle da pressão de alimentação dos ciclones, possibilitando controle do processo;
- Abertura e fechamento automáticos das válvulas dos ciclones, evitando assim a intervenção constante dos operadores no processo;
- Diminui a possibilidade de aterramento do mineroduto por malha muito grossa;
- Diminui a possibilidade de encrustamento de material no mineroduto, o que proporciona uma queda de pressão em alguns pontos da linha e gera a necessidade de manutenção corretiva;
- Possível controle da granulometria do material, mantendo o produto na especificação desejada;
- Evita a necessidade de remoagem de material quando ele se encontra com granulometria abaixo da desejada;
- Baixo custo de implantação do projeto (adição de um posicionador);
- Com o controle da granulometria do produto, os distúrbios presentes em todo o processo anterior por falta de especificação do produto diminuem;
- Redução no consumo de energia, devido à economia de energia que era gasta no bombeamento do material para o *Pound* e a redução do tempo de operação dos moinhos.

4.2.3 DESVANTAGENS

- Gera uma carga circulante (média de cinco por cento quando o ciclone opera em condições normais);
- Necessidade de incluir no plano de manutenção da equipe de instrumentação uma válvula de controle (PCV);
- Necessidade de um tempo dedicado ao treinamento dos operadores, para que todos sigam o novo procedimento operacional.

5. CONCLUSÃO

Grande parte dos sistemas de classificação mineral por hidrociclones encontrados na indústria possui controle de pressão de alimentação através da variação de velocidade das bombas que os alimentam. Esta variação de velocidade é feita por acoplamentos hidráulicos ou inversores de frequência. Neste trabalho, verificamos também é possível alcançar este controle através de uma válvula de controle de pressão instalada no distribuidor.

Após a instalação da válvula PCV, observamos que a pressão de alimentação da bateria TA-1413116 ainda varia, devido ao fato de se tratar de um sistema de grande porte e que está sujeito a muitos ruídos, porém, constatamos que esta variação tornou-se menor, oscilando dentro de uma faixa claramente identificada.

Apesar de controlarmos a pressão de alimentação do distribuidor e a densidade da polpa, a granulometria do produto final ainda continuou variando, devido a todas as variáveis que continuam interferindo no processo. A intervenção dos operadores, ligando e desligando moinhos, também interfere significativamente no resultado da granulometria.

Considerando as variáveis que foram controladas, e analisando o resultado da granulometria final, constatamos que a única variável que não foi controlada é a granulometria do minério de entrada, sendo esta essencial para o controle total do projeto.

Através dos resultados obtidos, observamos que o controle da pressão é indispensável para obter um corte definido, porém a densidade e a granulometria da polpa interferem mais no resultado final.

Proposta para estudos futuros

Com o controle de todas as variáveis que influenciam no processo de hidrociclonagem, é possível obter uma granulometria determinada do produto final. A granulometria de entrada é uma variável difícil de ser controlada no processo em questão, pois sofre influencia de vários outros processos, porém

conhecendo-se esta granulometria, é possível ajustar parâmetros de densidade e pressão para obter o produto desejado.

Para obter os parâmetros ideais para cada granulometria de entrada distinta, uma opção seria efetuar amostragens alterando pressão e densidade da polpa que alimenta o distribuidor da bateria.

Conhecendo-se os parâmetros ideais para cada granulometria de entrada, uma lógica de programação poderá ser desenvolvida no PLC, para que, depois de obtido o resultado de uma análise granulométrica da alimentação, os parâmetros sejam ajustados automaticamente, de forma que o processo se torne automatizado.

Para comparar a eficiência do resultado obtido no produto final, seria interessante estudar a respeito do tempo entre amostragens, com o intuito de verificar o intervalo de tempo com que os parâmetros necessitam ser ajustados.

6.

7. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, F. M. U. D. **SISTEMAS DE CONTROLE**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. NATAL, p. 96. 2007.

ARRUDA, A. A. D. **Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido**. Universidade Católica de Pernambuco. Pernambuco. 2008.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2^a. ed. São Paulo: Signus, v. I, 1946.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8^o. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

[HTTP://GE902FERRO.WORDPRESS.COM/PROCESSOS/TRATAMENTO-E-BENEFICIAMENTO..](http://GE902FERRO.WORDPRESS.COM/PROCESSOS/TRATAMENTO-E-BENEFICIAMENTO..) Acesso em: 23 Setembro 2013.

[HTTP://WWW.ICBA.COM.PE/H-HIDROCICLONES.HTML](http://WWW.ICBA.COM.PE/H-HIDROCICLONES.HTML). Disponível em: <<http://www.icba.com.pe/h-hidrociclones.html>>. Acesso em: 15 Outubro 2013.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5^a. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MEDRONHO, R. A. Solid-Liquid Separation. In: B., M.; HATTI-KAUL, R. **Isolation and Purifications of Proteins**. Nova York: Marcel Dekker Inc, 2003. Cap. 5, p. 131-134.

MELO, C. H. D. **Modelagem da Classificação de Minério de Ferro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5°. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, J. C. D. **REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO PARA SISTEMAS SUJEITOS A INCERTEZAS PARAMÉTRICAS**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, p. 70. 2011.

OLIVEIRA, M. D. S.; SOUZA, M. D. D. **Tratamento de Minérios**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, p. 242. 2012.

PESSA, R. **Instrumentação básica para controle de processo**. Centro de Treinamento SMAR. Sertãozinho. 2006.

QUEIROZ, J. C. B. D. **AUTOMAÇÃO VIII**. PUC MINAS. [S.I.], p. 46. CURSO: ENGENHARIA ELETRÔNICA DE TELACOMUNICAÇÃO. 2013.

SOBRE a Empresa: Vale Fertilizantes S.A. **Site da Vale Fertilizantes S.A.**, 2013. Disponível em: <www.valefertilizantes.com.br>. Acesso em: 20 Setembro 2013.

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid-Separation**. 3ª. ed. London: Butterworths, 1990.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 1°. ed. [S.I.]: UFMG, 2007.

WWW.PORMIN.GOV.BR. **Site da Pormin**, 2013. Disponível em: <<http://www.pormin.gov.br>>. Acesso em: 15 Outubro 2013.

APÊNDICE A

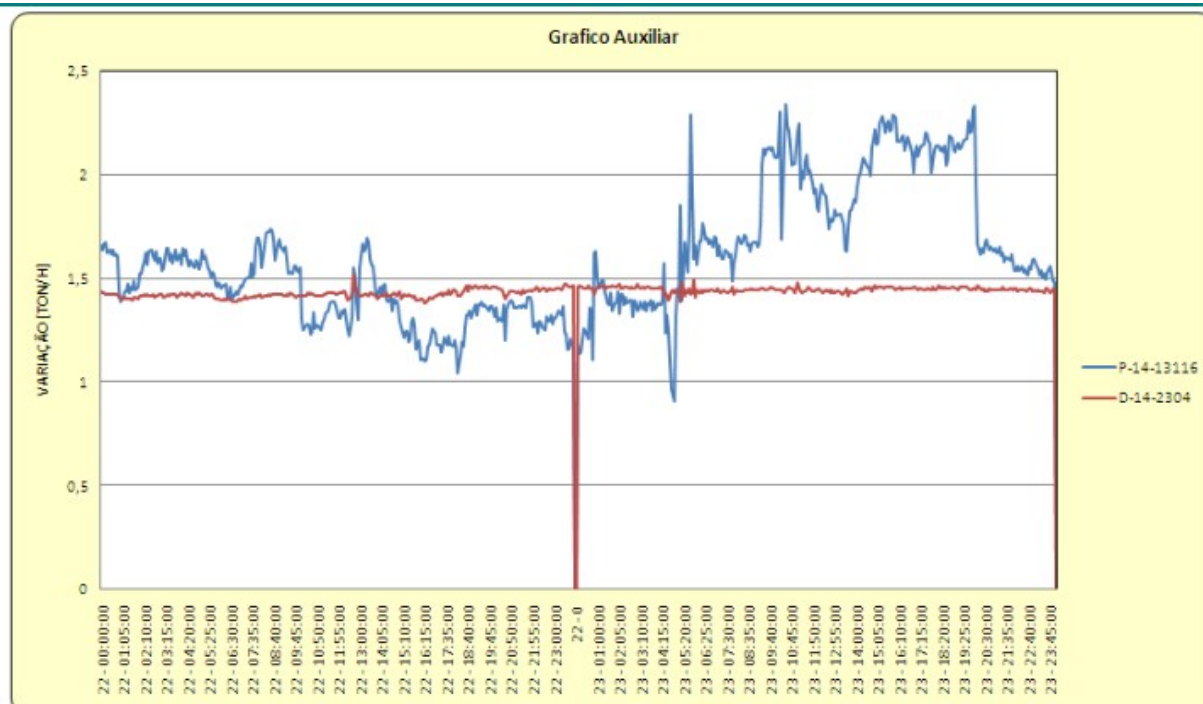


Figura 27 – Gráfico da pressão e densidade da bateria 1413116, correspondente aos dias 22 e 23 de Agosto de 2013. No gráfico foi plotado a densidade do material (vermelho) apenas para verificação se a mesma encontra-se constante.

Fonte: Própria autoria.

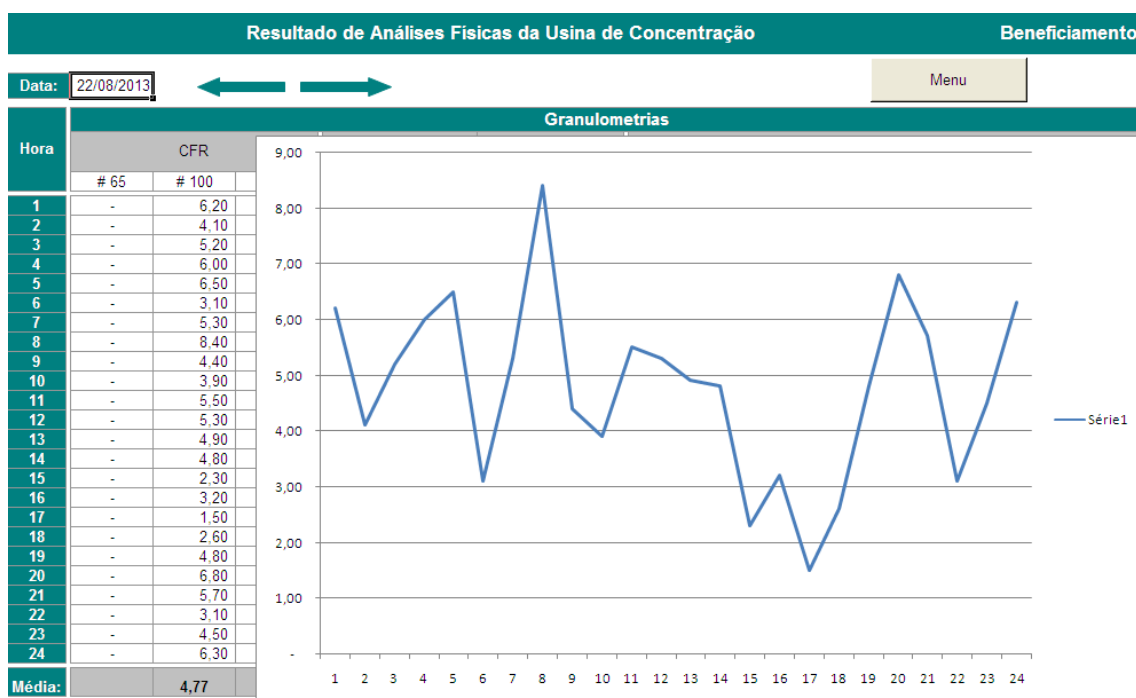


Figura 28 – Granulometria referente ao dia 01 de Agosto de 2013.

Fonte: Própria autoria.

APÊNDICE B

