

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Geraldo Pedro da Silva Lamon

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DINÂMICA DA DENSIDADE DE POLPA DE MINÉRIO DE
FERRO EM LINHA.**

Belo Horizonte
2017

Geraldo Pedro da Silva Lamon

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DINÂMICA DA DENSIDADE DE POLPA DE MINÉRIO DE
FERRO EM LINHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Américo Almeida
Magalhães Júnior.

Belo Horizonte

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

L234s	Lamon, Geraldo Pedro da Silva Sistema de medição dinâmica da densidade de polpa de minério de ferro em linha / Geraldo Pedro da Silva Lamon. Belo Horizonte, 2017. 106 f. : il. Orientador: Pedro Américo Almeida Magalhães Junior Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica 1. Minérios de ferro - Medição. 2. Processos de fabricação. 3. Medidores de fluxo. 4. Reologia. 5. Beneficiamento de minério. I. Magalhães Junior, Pedro Américo Almeida. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título. SIB PUC MINAS CDU: 622.7
-------	--

Geraldo Pedro da Silva Lamon

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DINÂMICA DA DENSIDADE DE POLPA DE MINÉRIO DE
FERRO EM LINHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior (Orientador) – PUC Minas

Prof. Dr. Marcos Roberto Alves – IF Sul de Minas

Prof.Dr. Claysson Bruno Santos Vimieiro – PUC Minas

Belo Horizonte, 22 de setembro de 2017

Dedico aos meus filhos e minha esposa, pela paciência e compreensão em permitir que entrasse nessa nova jornada, com meta de alcançar esse novo objetivo.

AGRADECIMENTOS

Esta Dissertação é dedicada ao Instituto Politécnico da Universidade Católica de Minas Gerais (IPUC) que, em 1971 concedeu-me o Título de Engenheiro. Agora, depois de profissionalizado pelos anos, novamente trilho o caminho do saber acadêmico, num esforço ainda maior para alcançar a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica; aos Professores, brilhantes e essenciais para que eu chegasse até aqui, meu carinho, admiração, respeito e sinceros agradecimentos. Aos colegas de turma, saudades e um lembrete; nunca deixe de serem estudantes; ao Prof. Dr. Sérgio de Moraes Hanriot, pela sua fundamental participação nesse trabalho que com autoridade na disciplina, profissionalismo, paciência e competência, conduzir-me-ão até a sua conclusão. E ainda, dedico aos meus filhos e minha esposa, pela paciência e compreensão em permitir que entrasse nessa nova jornada, com a meta de alcançar esse novo objetivo.

O autor agradece também, aos Professores que direta ou indiretamente contribuíram com seu apoio, sugestões, orientação na elaboração e formatação dessa dissertação. Em especial, agradeço ao Prof. Dr. Pedro Américo, que com muito zelo, injeção de ânimo e entusiasmo, sempre me motivou e estimulou a levar avante minhas idéias e projetos, constituindo-se hoje, o meu orientador. Ao Prof. Dr. Osmano Valente, atuante e crítico erudito na disposição e ordenação de textos e palavras de um todo. Agradeço também, aos engenheiros e técnico: da Indústria Mineradora Vale; Thiago R. Maia da Usina Brucutu, Oséias Soares e Evânio S. Bretas da Usina Vargem Grande; da Indústria Mineradora Samarco, Luiz Carlos e Luiz Filipe; da Lamon Produtos Ltda.; David Henrique, Flavio Reis de Andrade. Agradeço, ainda, Valéria Gomes, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e aos colegas de turma, professores, recordações e eternas saudades.

Tenha todos, fortaleza de ânimo para resistir os mais variados embates e tempestades no caminho. Não se iludam, pois, a estrada do bem pode estar cheia de tropeços e dificuldades... Continuem sempre a estudar e trabalhar. Não dê ouvidos às pedras colocadas em sua trajetória pela inveja, pelo ciúme, pela intriga. Marche sempre de cabeça erguida, confiantemente. Assim sendo, vencerá todos os obstáculos da caminhada. E, se for ferido na sua trajetória, lembre-se de que as cicatrizes serão luzes e frutos que marcarão a sua vitória.

MINUTOS DE SABEDORIA

C. T. Pastorino

Se você é pobre, trabalhe. Se for rico, trabalhe. Se estiver sob o peso de responsabilidades aparentemente injustas, trabalhe. Se você é feliz, continue a trabalhar; a preguiça dá lugar a dúvidas e receios. Se a fé titubeia e a razão falha, trabalhe; trabalhe como se sua vida estivesse em perigo, na realidade ela pode estar mesmo. Seja qual for o seu problema, trabalhe. Trabalhe fielmente e trabalhe com fé e energia. O trabalho é o maior remédio material que existe além de lhe render frutos no futuro. Ele cura tanto os padecimentos mentais como os físicos.

William Wallace Rose

RESUMO

A presente dissertação trata da medição da densidade da polpa de minério de ferro, em linha, nos processos industriais, contínuos e descontínuos. Os instrumentos disponíveis para este tipo de medição baseiam-se em diferentes técnicas e, estão disponíveis nos medidores radioativos, de massa, de garfos vibratórios, tomógrafos, por pressão diferencial, entre outros. Nos processos industriais de mineração, é muito importante se medir e controlar a densidade da polpa do minério de maneira contínua, em linha, pois assim sendo, se garante a uniformidade e qualidade do produto final ou na sequência de operação que o produto ainda poderá sofrer durante seu processamento. O objetivo proposto aborda a medição da densidade da polpa de minério de ferro, utilizando valores de pressão e nível, oriundas do tanque de homogeneização. O equipamento utilizado para determinação da densidade, MD-01LP, é descrito, assim como, o desempenho de sua medição em laboratório e em tanque específico de homogeneização da polpa de minério de ferro, no processo de mineração propriamente. Nos resultados dos primeiros ensaios e testes, o erro verificado no Laboratório interno foi de 0% e, na prática real da medição e transmissão na área industrial foi também de total sucesso onde na primeira avaliação comparativa com o Laboratório da Empresa o erro encontrado alcançou 0,87% e na segunda avaliação o erro foi de 0,17%. Assim sendo, o projeto e os resultados foram animadores.

Palavras-chave: Densidade. Medição. Pressão diferencial. Moinho de bolas. Mineração. Contrôles de processos industriais. Instrumentação.

ABSTRACT

The present dissertation deals with the measurement of the density of the pulp of iron ore, in line, in the industrial processes, continuous and discontinuous. The instruments available for this type of measurement are based on different techniques and are available in radioactive, mass, vibrating forks, tomographs, differential pressure and others. In industrial mining processes, it is very important to measure and control the pulp density of the ore continuously, in line, because in this way, it guarantees the uniformity and quality of the final product or in the sequence of operation that the product may still suffer during processing. The proposed objective addresses the measurement of iron ore pulp density using pressure and level values from the homogenization tank. The equipment used for density determination, MD-01LP, is described, as well as the performance of its measurement in laboratory and in the specific tank of homogenization of the iron ore pulp, in the mining process itself. In the results of the first tests and tests, the error found in the internal Laboratory was 0% and in the real practice of measurement and transmission in the industrial area was also of total success where in the first comparative evaluation with the Laboratory of the Company the error found reached, 0,87% and in the second evaluation the error was of 0.17%. Therefore, the project and the results were encouraging.

Keywords: Density; Measurement. Differential pressure. Ball mill. Mining. Control of industrial processes. Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxograma Simplificado.....	17
FIGURA 2 - Moinho de Bolas Mineração	26
FIGURA 3 – Diagrama do controle moinho de bolas – CBMM - Araxá.....	30
FIGURA 5 - Estratégia específica para medição e controle da densidade interna do moinho de bolas.	32
FIGURA 6 - Tanque de Homogeneização-Vale	33
FIGURA 7 - Tanque de Homogeneização-Vale	33
FIGURA 8 - Medição da Densidade processo Radioativo.....	35
FIGURA 9 - Medição da Densidade processo MD-01LP	35
FIGURA 10 – Esquemática de um controle de processo	36
FIGURA 11- Curva de ação e resposta de controle	38
FIGURA 12 - Medidor radioativo – Vega S/A	48
FIGURA 13 - Medidor de células capacitivas para nível e ou pressão.....	49
FIGURA 14 - Medidor de densidade ondas guiadas- WIKA Controls	51
FIGURA 15 - Medidor de densidade tipo garfo - Emerson.....	52
FIGURA 16 - Medidor mássico Coriolis- Emerson	53
FIGURA 17 - Medidor MD-01LP – Lamon Produtos	54
FIGURA 18 - Resumo técnico	60
FIGURA 19 - Diagrama em Blocos Eletrônicos da interligação do MD-01LP	61
FIGURA 20–Especificação modal	63
FIGURA 21A circuito eletrônico - detalhamento.....	64
FIGURA 21B - circuito eletrônico - detalhamento.....	65
FIGURA 22–Placa de circuito impresso	66
FIGURA 23 – Lista de Material DENSI. Rev01	67
FIGURA 24 - Dispositivo tanque de simulação e teste de Bancada.....	68

FIGURA 25 - Tanque de Homogeneização-Vale	70
FIGURA 26 - Tanque de Homogeneização-Vale	71
FIGURA 27 – Medidor ultrassônico de Nível– SOLID	72
FIGURA 28 – Cápsula de Pressão – JUMO.....	73
FIGURA 29 - Cápsula pressão por imersão – GE.....	74
FIGURA 30 - Borbulhador tradicional.....	75
FIGURA 31 - Ligação do MD-01LP - Modalidade Passivo/passivo.....	77
FIGURA 32 - Modalidade de Ligação do MD01LP. Ativo/ativo	78
FIGURA 33- Ligação do MD-01LP – Modalidade Ativo/passivo.....	78
FIGURA 34 - Ligação simples Leitor de Corrente - Modalidade ligação passiva	79
FIGURA 35 - Linhas de Programação do MD-01LP– Firmware.....	80
FIGURA 36 - Registro variação nível com densidade constante, (Água pura).....	83
FIGURA 37 - Medição com registro densidade constante (Glicerina d=1,24).....	83
FIGURA 38 - Medição com densidade constante (Silicato Sódio d=1,55)	84
FIGURA 39 - Variação do nível com densidade constante (Silicato Sódio, 1,55)	84
FIGURA 40 - Gráfico densidade registrada em operação (Período de 04 dias a partir de 18/03)	85
FIGURA 41- Gráfico densidade com registro na operação (Período 09 dias, a partir de 21 a 30/03)	86
FIGURA 42 - Gráfico expandido (espectro), da densidade	87
FIGURA 43 - Gráfico densidade e nível operação tanque período de 09 dias.....	88
FIGURA 44 - Gráfico dois períodos de 24 horas densidade/nível. PLC-CCO Vale..	89

LISTA DE SIGLAS

ALM	Alarme
CV	Válvula de controle
DIV	Divisor de sinais
DR	Registrador de densidade
DT	Registrador de densidade
FIC	Controlador indicador de Vazão
FR	Registrador de vazão
FY	Conversor de sinal elétrico/pneumático
HS	Chave seletora
I/V	Conversor sinal corrente para tensão
INT	Totalizador
IPUC-MG	Instituto Politécnico da Universidade Católica de Minas Gerais
ISO	International Organization for Standardization
LC	Controlador de nível
LR	Registrador de nível
MKS	Sistema de unidades [metro, quilograma, segundo]
MUL	Multiplicador de sinais
PC	Controlador de pressão
PR	Registrador de pressão
RATIO	Razão de sinais p/ controle
SI	Sistema internacional de unidades
SOM	Somador de sinais
SUB	Subtrator de sinais
WC	Controlador de massa
WR	Registrador de massa
A/D	Analógico/Digital
D/A	Digital/Analógico
SMD	Surface Mount Device
USB	Universal Serial Bus
RS 232	Protocolo comunicação Serial (Recommended Standard)
RSP	Remote Set Point
PID	Proporcional Integral Derivativo

NOMENCLATURA

A_m	Área molhada [m^2]
C	Coeficiente de descarga
F	Força [Newton] = $kg.m/s^2$
H_c	Altura lâmina hidráulica [m]
I	Declividade [m/m]
K	Constante de Parshall
kg	Quilograma
L	Comprimento [m]
L_c	Largura da crista do Vertedor [m]
M	Massa [kg]
m	Metro
Q	Vazão [m^3/h , m^3/min , m^3/s]
R_H	Raio hidráulico [m]
s	Segundo
T	Tempo [s]
V	Volume [m^3]
δ	Massa específica ou densidade absoluta [kg/m^3]
δ_a	Massa específica da água a $4^\circ C = 1000 \text{ kg/m}^3$
δ_p	Massa específica da polpa [kg/m^3]
Θ	Ângulo de abertura da área molhada
λ	Rugosidade de canal
ρ	Densidade relativa

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Histórico.....	14
1.2 Justificativa.....	16
1.3 Fundamentação: Polpa ou Lama	17
1.4 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo Geral	18
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	18
1.5 Motivação.....	19
1.6 Escopo	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 - Densidade	21
2.2 Densidade relativa.....	22
2.3 Variáveis do processo: Densidade; Massa; Vazão; Pressão e Nível	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1 Literatura e Estado da Arte.....	40
3.2 <i>Medidores desenvolvidos ou em processo de homologação</i>	47
3.2.1 Medidor radioativo	48
3.2.2 <i>Medidor de células capacitivas</i>	49
3.2.3 <i>Tomógrafo</i>	50
3.2.4 <i>Medidor de densidade por micro-ondas guiada</i>	51
3.2.5 <i>Medidor de densidade por Garfo Vibratório</i>	52
3.2.6 <i>Medidor mássico Coriolis</i>	53
3.2.7 <i>Medidor de densidade MD-01LP</i>	54
4 METODOLOGIA	56
4.1 Etapas do Trabalho	57
4.2 Metodologia experimental de Laboratório	58
4.3 Metodologia experimental no processo Industrial	59
4.4 Etapas de execução	60
4.5 Estrutura de montagem para teste de operação	68
4.5.1 <i>Montagem em Laboratório</i>	68
4.5.2 <i>Instalação do ultrasson no tanque homogeneização</i>	70
4.5.3 <i>Instalação da cápsula de pressão</i>	71
4.5.4 <i>Instrumentos utilizados no Laboratório e na área industrial</i>	72
4.5.5 <i>Exatidão do MD-01LP</i>	76
4.5.7 <i>Linhas de Programação – firmware</i>	79
5 ANALISE DE RESULTADOS	81
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
REFERÊNCIAS.....	95

APÊNDICES A - Ficha técnica – MD-01LP.....	100
APÊNDICE B - Comentário sobre a operação do MD-01LP no processo.....	101
APÊNDICE C - Observações gerais.....	102
APÊNDICE D - Surgimento de um novo equipamento – MD-02LP.....	103
APÊNDICE E – Relacionamento com cliente usuário	106

1 INTRODUÇÃO

A presente proposta trata-se de um projeto destinado a medição da densidade da polpa de minério de ferro em linha. O equipamento a ser desenvolvido é um novo e inédito sistema de medição com instrumentação eletrônica para ser empregado com a finalidade de medir a densidade de fluídos, para as empresas de mineração.

Nas empresas de mineração, voltadas para a depuração ou concentração do minério lavrado que via de regra sempre está associado a uma série de outros minerais ou impurezas indesejáveis, as quais normalmente são retiradas e expurgadas por processamento físico, onde uma série de processos, tendo como premissa a separação do minério útil, (Fe_2O_3), da ganga lavrada, (ganga é a parte do minério que não se tem interesse comercial econômico), sendo assim, separada e descartada em barragem de rejeitos. A obtenção final da parte desejada, o minério (Fe_2O_3) puro e concentrado, com seu teor máximo, seguirá para outros processos. O método utilizado nesse processo particular é o método físico, podendo ser dividido sequencialmente em:

- a) Lavra do minério;
- b) Transporte e fragmentação primária;
- c) Classificação por peneiramento;
- d) Moagem final com controle, “moinho de bolas”;
- e) Transporte úmido, normalmente por gravidade;
- f) Homogeneização – Trabalho realizado nesta etapa
- g) Transporte para concentração;
- h) Transporte para venda e outros processos para agregar valor.

O projeto proposto nessa dissertação está diretamente atrelado ao item f, homogeneização, que é um processo importante para a flotação, assim como, no transporte a grande distancia como nos minero dutos.

1.1 Histórico

A medição e o controle da densidade dentro de um moinho, principalmente o moinho de bolas, é uma variável cujo controle é muito importante para se maximizar

o rendimento produtivo do mesmo. Todavia, é muito difícil ou impossível medir de maneira direta a densidade interna do mesmo. Indiretamente pode-se calcular o valor da densidade por meio da medição das variáveis dos insumos que entram no moinho, se misturam e, a partir dessas medições, calcular em tempo real a sua densidade interna de moagem. Esse processo, conhecido como meio indireto da medição, foi introduzido no ano de 1982, pelo engenheiro Geraldo Lamon da empresa Foxboro Inc. USA e os engenheiros Luiz Paulo e Eurico da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)– Araxá – MG.

Conhecendo internamente no moinho a densidade medida e transmitida, compara-se a mesma com a referência ou o “**set-point**” desejado no processo. Havendo desvio na comparação, atua-se manual ou automaticamente, sobre uma ou mais variável de entrada no moinho, de modo a obter sempre a densidade desejada para aquele processo de moagem.

Uma segunda estratégia a ser utilizada, a qual seria ideal é a medição da densidade na saída do moinho, por meio do medidor primário radioativo. Por outro lado, nem sempre existe a condição ou possibilidade de medição da densidade na saída do moinho, pois a polpa sai e, por gravidade em tubulação, a polpa desce, desordenadamente, sendo direcionada para o tanque de homogeneização. Além dos problemas intrínsecos da utilização do sistema radioativo, que apesar de ser o mais usado atualmente, na medição de densidade, traz consigo problemas de periculosidade extremamente preocupante dentro do plano gerencial das empresas. Assim sendo, a medição interna e o controle ótimo da densidade dentro da moagem, ainda parece ter um grau de dificuldade muito elevado na visão das empresas e particularmente de seus técnicos. Na Companhia Vale, o controle interno da moagem é medido e controlado aparentemente, pela potência elétrica do moinho. Essa estratégia, apesar de difundida por alguns setores e, a seus técnicos, não se parece ser o “**state of art**” da medição. Da saída do moinho, a polpa vai para o tanque de equalização e homogeneização, onde se mede e controla diretamente uma determinada densidade, por meio de adição de água controlada, diretamente sobre a polpa. Através de bombeamento, a polpa agora com densidade medida e controlada ou não segue, por exemplo, para a flotação, onde se realiza a concentração propriamente desejada do minério moído, obtendo-se ali, um minério de ferro, fino, puro e concentrado como se fosse uma hematita compacta, (Fe_2O_3), constituída por +/-70% de ferro e +/-30% de oxigênio.

1.2 Justificativa

Os tanques de equalização e homogeneização, existente em grande número nas mineradoras, por exemplo, no complexo da Mineradora Samarco, em Mariana – MG existem mais de 16 tanques dessa natureza.

Na Cia Vale centenas deles estão instalados, operando nas plantas de concentração, espalhados pelo Estado de Minas, assim como em outras empresas da área da mineração. Para essas empresas que se propõe essa nova alternativa tecnológica de medição da densidade em linha.

Atualmente, as medições de densidade nas empresas de mineração, são realizadas por medidores radioativos, que são ótimos medidores, estáveis, repetitivos e confiáveis nas medições, porém, considerados na atualidade problemáticos, no aspecto da segurança pessoal, na visão da empresa e do Ministério do Trabalho. Sua substituição é eminente, sem procrastinação, quando da aprovação e homologação dos novos modelos que hoje estão chegando para teste de seu desempenho e a consequente certificação pelas companhias como Vale, Samarco, CBMM entre outras. Assim, os antigos e bons medidores radioativos poderão ser erradicados na medição e controle dos tanques ou em outras aplicações, tão logo os novos que chegam sejam aprovados e homologados. A procura do possível e novo substituto é pelo fato dos radioativos serem considerados perigosos quando requerem manutenção, pois são considerados emissores de partículas radioativas oriundas de cápsulas possivelmente de Cobalto 60, ou cápsula de Césio. Por outro lado, o problema para a empresa torna-se maior quando necessário descartar o equipamento por motivo maior quanto a seu uso no processo.

1.3 Fundamentação: Polpa ou Lama

Figura 1 – Fluxograma Simplificado



Fonte: Elaborado pelo autor

O produto final do fluxograma, Fig.-1, é o rejeito composto de sílica, argila, outros elementos indesejável e água, que vão direto para descarte em barragem de contenção de rejeitos, podendo assim, ser dito lama. A pasta constituída de minério fino, também classificado como produto final, agora concentrado, poderá ainda ter ou não sua densidade medida e controlada em um novo tanque de homogeneização. Na linguagem coloquial, esta nova pasta de minério concentrado pode assim ser chamada de polpa de minério de ferro, Fe_2O_3 .

1.4 Objetivos

O objetivo que pauta esse trabalho é o projeto do equipamento MD-01LP, e sua respectiva operosidade na prática da medição da densidade da polpa do minério de ferro na indústria de mineração, visando à substituição dos perigosos medidores radioativos, ainda hoje largamente utilizados nas medições de densidade nas empresas de mineração que, de certa forma tendem a ser descartados pela empresa e ou proibidos pelos órgãos ambientais.

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação é a medição dinâmica da densidade da polpa do minério de ferro a ser controlada, utilizando uma técnica inovadora com a finalidade de se obter medição com estabilidade e exatidão, no processo de homogeneização, que posteriormente sua concentração controlada segue para o respectivo transporte para outros processos de produção de “**commodities**”, mais nobre como pelotas, fino concentrado ou mesmo a possível sinterização, segundo demanda Nacional ou Internacional.

1.4.2 Objetivos específicos

Como objetivo específico da dissertação cita-se;

- Projeto do sistema de medição, original, com o codinome de MD-01LP destinado à medição e transmissão de sinal da densidade e, em consequência, seu efetivo controle.
- Calibrar e testar o sistema de medição proposto, tanto experimentalmente em laboratório como na indústria de mineração;
- Analisar as exatidões obtidas com o sistema de medição proposto;
- Desenvolvimento de uma metodologia para medição de densidade de fluidos diversos e ou material pastoso, em diferentes tipos de indústria de transformação, assim como na polpa de rejeitos do minério de ferro e outros metais
- Analisar atividades de beneficiamento, de natureza continua ou não do minério concentrado, visando a sua venda como produto final concentrado, ou ainda, sua sinterização ou mesmo pelletização, também denominados produto final acabado de maior valor agregado, tendo como fins na utilização a indústria nacional ou internacional.

1.5 Motivação

A motivação e justificativa para o desenvolvimento dessa medição dinâmica, micro processada, para a medição de densidade da polpa, no tanque de homogeneização, ou mesmo outras densidades aquosas em tanques diversos de outras novas indústrias de transformação, muito se justifica o projeto e sua execução, não só pelo desempenho esperado e inovador, assim como pela sua competitividade no mercado de instrumentação e controle de processo onde se espera que o MD-01LP alcance seu objetivo.

Especificando, a área de mineração, onde os medidores radioativos operam há vários anos com ótimos resultados, sem qualquer dúvida de sua repetibilidade e exatidão que depois de calibrado, funcionam com uma qualidade operacional excelente, todavia, têm como atributo negativo, sua periculosidade operacional e elevado valor econômico no seu custo e na manutenção. Apesar de caro, o preço não é o fator mais preocupante para as empresas, senão o problema da radioatividade.

Na atualidade, com novas tecnologias aparecendo para competir com os mesmos, o MD-01LP é mais uma opção nessa competição. Sua operosidade é simples, baixo custo, tendo ainda como grande vantagem técnica, a independência da temperatura, nível, e o gradiente da densidade do particulado que normalmente acontece dentro do tanque de homogeneização. Por outro lado, pode-se notar que o medidor radioativo, mede a densidade diretamente na tubulação onde o escoamento acontece de maneira forçada por meio de bombeamento e, não raro, com a medição distante do tanque de homogeneização onde o controle da densidade de fato acontece, ou seja, medição da densidade bem depois do controle. Esse fato por essa condição, pode muitas das vezes, dificultar ou causar oscilações no controle a montante.

Dentro do exposto, acredita-se que desenvolver, aperfeiçoar, atualizar e adaptar a tecnologia aos anseios do usuário potencial como a Vale, é uma oportunidade que não deve ser negligenciada, senão seguir de perto com obstinação e trabalho no projeto de medição. Nesse aspecto particular, reside essa total motivação.

1.6 Escopo

É o propósito e escopo primário, mostrar como se desenvolve e projeta um equipamento micro processado, MD-01LP, multifuncional que terá como função principal a medição da densidade em soluções líquida, pastosas, ou na forma de polpa. Logo após a medição, o MD-01LP transmitirá sinal eletrônico padrão, 4,00 a 20,00 mA, equivalente a densidade medida. Além desse escopo alvo do projeto principal, sua placa eletrônica contendo o hardware, opera com o microprocessador PIC18F4620 de 8 bits com 64K bytes de memória flash e 3K de memória RAM, fabricado pela Microchip Technology, suportando pela simples alteração de seu *firmware*, nascimento de um outro novo modelo de equipamento que se denominará, MQ-02LP, destinado a medir, indicar e totalizar escoamento em canais livres ou vertedores, tendo como saída sinal padrão de corrente, 4,00 a 20,00 mA proporcional a vazão indicada. É importante observar que a placa de circuito impresso, já anteriormente desenvolvida e consagrada, está hoje adaptada e simplificada para o protótipo, MD-01LP. Todavia, uma nova placa (FIG.22), foi reprojetaada fazendo parte dessa dissertação, contendo o mesmo microprocessador PIC18F4620. Como todo processo eletrônico é muito dinâmico, em futuro próximo, uma nova topologia eletrônica empregando novo microprocessador, mais moderno e possante, poderá vir a ser adotada numa nova revisão técnica onde o consumo em termos de energia será menor, tendo maior capacidade de processamento, maior rapidez, maior capacidade de armazenamento de dados, maior exatidão, rotinas de cálculo mais fácil de ser incorporadas, operando com periféricos A/D, D/A mais atualizados, tendo todos seus componentes e pinagem, na tecnologia SMD, além de ser introduzido novo canal de comunicação USB ao invés de RS 232.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Como referencial teórico é apresentado alguns dos poucos estudos relacionados com o desenvolvimento de técnicas e práticas na pesquisa e montagem de equipamentos direcionados a medição da densidade em linha. São estudos de natureza teórica experimental, produzidos e pesquisados em grandes universidades. Todavia, trabalhos específicos ou artigos sobre a medição da densidade da polpa de minério de ferro não se encontra na especificidade requerida, assim como material específico subscrito ou elencado. Na referência bibliográfica, elencam-se artigos e equipamentos de fabricantes nacionais e ou internacionais, proponentes à medição de densidade nas mais variadas áreas da indústria de natureza diversa porém, os trabalhos ou artigos listados ou citados nessa dissertação, pouco ajudam ou tem de conteúdo profundo, na área de mineração integrada aos ferrosos com caracterização de efeitos comuns e práticos para ser efetivamente referenciado como forte ajuda ou consulta, contendo muito pouco fundamento prático na indústria de concentração do minério de ferro nos dizeres constitutivos ou de composição utilitária para essa dissertação acadêmica.

2.1 - Densidade

A densidade, analiticamente pode ser expressa como densidade absoluta ou densidade relativa. Em definição, a densidade absoluta, no sistema “SI”, (Sistema Internacional de Pesos e Medidas) é a massa de um fluido, expressa em quilograma, por uma unidade de volume, ou seja, **(kg/m³)**. Já no sistema “MKS”, metrologicamente, a unidade dimensional seria **kgf.s²/m⁻⁴**. (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 1995). Também se pode inferi-la, como massa específica. Já a densidade relativa, é a relação entre a massa específica de um fluido sobre a massa específica de outro fluido, tomado como base ou referência. No caso particular de fluidos, a referência, normalmente é a água pura que tem sua massa específica igual a 0,99996 kg/dm³, a 4°C.

$$\text{Massa específica } \delta = M/V$$

δ = Massa específica ou densidade absoluta (kg/m³)

M = Massa do fluido (kg)

V = Volume correspondente (m³)

Dimensionamento: (VIM – INMETRO 1995)

$$\delta = \frac{M}{L^3} = M \cdot L^{-3} = \frac{F \cdot L^{-1} \cdot T^2}{L^3} = F \cdot L^{-4} \cdot T^2 \text{ ou seja, } \frac{F}{m \cdot s^2} = \frac{kg \cdot m/s^2}{m \cdot s^2} = kg/m^3 \quad (01)$$

Onde,

M = massa (kg)

L = comprimento (m)

T = tempo (s)

F = força (N)

kg = quilograma

m = metro

s = segundo

2.2 Densidade relativa

No caso particular da polpa, sua densidade relativa é seu peso, ou a massa de um determinado volume, (minério mais água), sobre o peso ou massa do mesmo volume de água.

$$\rho = \frac{\delta p}{\delta a} = \frac{kg/m^3}{kg/m^3} = n^o \text{ puro, ou seja, adimensional} \quad (02)$$

Onde,

ρ = densidade relativa

δp = massa específica da polpa

δa = massa específica da água a 4°C

Exemplo:

Um metro cúbico de água, que em condições normais pesa 1000 kg, adiciona-se 600 kg de minério fino classificado, nesse mesmo volume. Automaticamente, o volume aumentara, por exemplo, para 1,10 m³, então se tem,

$$\left[\frac{(1000+600)/1.10}{1000/1} \right] = \frac{1600}{1100} = 1,4 \quad (03)$$

Assim sendo, a nova mistura, polpa de minério ferro, terá como valor a densidade, a relativa, $\rho = 1,45$.

2.3 Variáveis do processo: Densidade; Massa; Vazão; Pressão e Nível

Na indústria de mineração ferrífera de Minas Gerais, atualmente opera-se com minério de baixa concentração de Fe_2O_3 , onde a hematita compacta praticamente já exauriu. O minério hoje processado pelas empresas é pobre, pois a ele está associado a sílica, argila e outros minerais indesejáveis que deverão ser retirados pelo processo de moagem seguido da concentração propriamente por meio da flotação. No processo industrial, as variáveis mencionadas são muito importantes e impactantes no controle geral dos processos coadjuvantes da concentração. A densidade, variável plenamente discutida e trabalhada em todas as nuances dessa dissertação tem sua medição realizada pelo método radioativo e a partir dessa dissertação introduziu-se o novo medidor de densidade o MD-01LP. A dimensional de medição da densidade é a tonelada por metro cúbico, também podendo ser representada por um valor absoluto a partir de 1,00 para água pura. Doravante definem-se as variáveis coadjuvantes no processo industrial da mineração.

Massa, representada pelo peso do minério que depois de triturado pelo britador primário é classificado por peneiramento, seguindo para moinho por correia transportadora, a qual se pesa por balança com célula de carga num processo contínuo de pesagem, transmitindo sinal de 4 a 20 mA na unidade de tonelada/hora.

Vazão, variável representada por metros cúbico/hora. É uma das mais usadas na mineração. Sua medição é feita na sua totalidade dentro e fora da planta de mineração por medidores magnéticos de vazão. Água é o insumo mais usado em todos os processos. Especificando, na área de moagem, mede-se e controla a vazão de água para o moinho assim como, para o tanque de homogeneização. A polpa depois de diluída, concentrada ou não, sua medição em vazão é feita pelo medidor magnético de vazão. O medidor magnético tem como princípio de medição a lei de Faraday. A polpa escoando, tem certa condutividade elétrica, não pelo minério fino nela contido, mas pela água que é eletricamente condutiva. Assim a polpa escoando entre dois eletrodos, cortado por um campo magnético produzido por bobinas diametralmente opostas e posicionado ortogonal ao plano dos dois eletrodos que estão ligados entre si pela polpa que ao se mover escoando, torna-se

sede de uma força eletromotriz induzida captada pelos eletrodos. A partir dos eletrodos, a f.e.m., gerada fecha o circuito com o amplificador de sinal medindo e transmitindo sinal de 4 a 20 mA ou sinal de pulso equivalente a velocidade do fluido escoante. Como a vazão é velocidade vezes área do tubo carretel do medidor, tem-se então o sinal padronizado equivalente a vazão da polpa, constituída por água mais minério de ferro moído e fino.

Pressão, variável medida em termos de Kgf/cm^2 , o que significa força por unidade de área, ou ainda em mca, (metro de coluna de água). Seu controle na mineração é pouco utilizado ou explorado, senão sua medição efetiva por manômetros indicadores de pressão, normalmente instalados na saída de bombas. Exceção pode ser observada na medição, transmissão e controle da pressão de entrada no ciclone onde se separa a polpa fina da polpa rejeitada que retorna ao moinho.

Nível, grandeza definida como altura do conteúdo de um reservatório, tanque de armazenamento, tanque de mistura com ou sem controle. Na mineração, vários são os tanques onde o nível é medido em metros ou percentual de 0 a 100%, transmitindo sinal para o respectivo controle como nos tanques de homogeneização da polpa, tanques primários e secundários de flotação, etc.

Três são os tipos de medição de nível;

- a)- direto;
- b)- indireto,
- c)- descontínuo.

Na medição direta, utiliza-se, por exemplo, régua, visor, flutuador ou bóia, célula piezo resistiva, borbulhador ou ainda o ultrassom.

Na medição indireta, o nível é medido em função de grandezas físicas a ele relacionadas, como por exemplo, pressão, deflexão de diafragma, empuxo, propriedades elétricas, etc.

Na medição descontínua apenas se observa quando o nível atinge certos pontos específicos predeterminados, por exemplo, nível alto, muito alto, nível baixo, etc.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos acadêmicos retratados como **“estado da arte”**, com especificidade na medição contínua ou na medição em laboratório, publicados como medição de densidade de minério, ou mesmo lama, também denominada rejeito de minério, tendo ou não transmissão de sinal eletrônico equivalente, são poucos esclarecedores na visão de seu emprego prático da medição em mineração. Dos trabalhos elencados e publicados, inclusive, com solicitação de patente, nenhum deles encontra-se em utilização prática nas medições em mineração, senão aquele muito antigo, universalmente utilizado que é o medidor transmissor radioativo e, agora por ultimo, o medidor de densidade desenvolvido pela Smar Equipamentos Eletrônicos, modelo DT-301. Tais trabalhos, desenvolvidos e publicados em termos da medição em linha, apesar de poucos, podem ser conhecidos nos artigos disponíveis em diversos sites científicos.

Dos artigos aplicados na área de medição e transmissão de densidade, raros são aqueles desenvolvidos para medição da polpa em linha. De um modo geral, são direcionados para medição na indústria de celulose, biomassa de açúcar de cana, produtos da indústria alimentícia, detergente, etc.

Introduziu-se inicialmente, o conceito de cálculo instrumental e a respectiva medição da densidade, de maneira indireta, com cartões eletrônicos analógicos, em moinho que fragmenta o minério em meio úmido, no moinho de bolas, Fig. 2, *“(netzsch-grinding.com)-Indústria e Comercio de Equipamentos de Moagem Ltda”*. Quanto à revisão bibliográfica propriamente, cita-se, mostrando com seus respectivos fabricantes os instrumentos aplicáveis na medição e transmissão de sinal equivalente a densidade da polpa de minério de ferro. Os instrumentos medidores transmissores de densidade que serão citados nessa dissertação são de procedência nacional ou internacional.

Figura 2 - Moinho de Bolas Mineração



Fonte: METSO, 2016

O moinho de bolas, Fig.2, varia muito de tamanho, tendo em média, nas usinas de mineração de grande porte, um comprimento aproximado de 06 a 07 metros, com diâmetro interno de mais ou menos 4,0 metros. Quase metade de seu diâmetro interno é preenchida com esferas de aço, num total de mais ou menos, 70 a 100 toneladas de esferas trituradoras do minério. O moinho gira numa velocidade tal que as esferas sobem pela superfície interna, caindo esmagando o minério, que entra em tamanho classificado, saindo naturalmente fino.

É importante observar que sua velocidade de giro deve ser bem característica segundo o tamanho e peso das esferas. Normalmente os moinhos de bolas giram numa velocidade entre 70 a 85% da velocidade crítica, ou seja, velocidade crítica é aquela na qual a carga é centrifugada, girando solidaria as paredes internas do moinho. Tal velocidade esta entre +/- 100 RPM. Quanto as esferas de aço, variam em tamanho entre 2 a 3 polegadas de diâmetro. Por outro lado, velocidades mais baixas tendem a diminuir o efeito de moagem nas zonas de quebra ou impacto, resultando uma operação de fragmentação apenas por atrito. Daí a necessidade de se determinar uma velocidade ótima de rotação, a fim de maximizar a eficiência da moagem.

Internamente dentro do moinho, em carga, têm-se as zonas de cisalhamento, de impacto e quebra. Por esse motivo que se justifica o controle da densidade da pasta ou polpa interna. À medida que o moinho é alimentado, haverá um equilíbrio, saindo à mesma quantidade de finos em forma de pasta, equivalente a entrada de minério pré-tratado, onde a variação de tamanho é irregular, apesar de ser classificado por peneiras. O rendimento da moagem de um moinho de bolas está

relacionado ou dependente de quatro ou cinco variáveis, são elas; rotação, tamanho das esferas de aço, quantidade, peso e densidade interna da moagem.

- Rotação crítica do moinho = +/-100RPM
- Diâmetro relativo das esferas de aço = 2 a 3 polegadas
- Quantidade de esferas em peso= 70 a 100 toneladas
- Densidade relativa da polpa dentro do moinho = pasta

A rotação, tamanho, peso e quantidade de esferas, são variáveis que após definidas e ajustadas, tornam-se constantes. O tamanho máximo do corpo moedor (bolas), deve ser o suficiente para quebrar as partículas do minério alimentado. Seu tamanho nominal e consequentemente peso, deve ser tal que venha propiciar uma boa fragmentação sem, no entanto, provocar um desgaste elevado no revestimento interno do moinho. A fórmula de Bond é a mais usada ou conhecida para determinar o tamanho máximo das esferas ou bolas de aço, (SANCHEZ; MATSUSHITA; PONS 1990). Por outro lado, a densidade interna da moagem é uma variável que pode a todo instante, está variando, daí a necessidade de sua medição e ajuste por meio do controle automático, garantindo dessa forma a estabilidade do rendimento máximo da moagem.

Os moinhos de bolas, especialmente nas empresas de mineração, do Estado Minas Gerais, acreditam-se, não existir a preocupação em adotar a estratégia da medição correta da densidade interna do moinho, pois a dificuldade de sua medição e em consequência o respectivo controle efetivo interno da densidade baseado nessa estratégia da medição, ser muito difícil. De um modo geral, as empresas têm adotado como base para controle a potência elétrica do moinho.

A polpa saindo do moinho segue direto para o tanque de homogeneização. Esse transporte, conduzido por gravidade, impossibilita por completo a medição da densidade, pois a tubulação que transporta a polpa, muito das vezes não opera completamente cheia, apresentando bolsões ou espaços vazios internamente o que causaria erros grosseiros na medição. Na hipótese da transferência da polpa do moinho para o tanque de homogeneização via bombeamento, podem existir condições favoráveis de medição a qual seria por meio de medidor radioativo. Ainda, para a condição ideal de medição da densidade nesse particular, na instalação do medidor radioativo, deve ser respeitado ou observado no local de sua instalação e medição, tubulação em condições de estar sempre cheia, tendo trecho reto que

obedeça às normas técnicas do fabricante do medidor de densidade radioativa, o que nem sempre é possível.

A estratégia do controle da densidade da moagem do minério somente pela adição proporcional da água, manipulada pela pesagem continua do minério, não é plenamente satisfatório, tendo em vista que sua umidade é variável, assim como, o retorno de polpa vinda do rejeito do ciclone, ser irregular tanto em termos do minério parcialmente rejeitado, assim como, a água nele associada. Considerando as variáveis sem controle na entrada, e na impossibilidade da medição da densidade, via radioativo, partiu-se para o estudo e a respectiva solução através do cálculo indireto da densidade interna do moinho.

Essa possibilidade, após ser estudada, desenvolvida analiticamente e, definida como fácil de ser implantada, foi colocada em apreciação como possibilidade na operação no moinho de bolas no processamento do minério de Nióbio da Cia CBMM de Araxá - MG, no ano de 1982. Com a finalidade de se conseguir variar as alternativas de medição para comandar o controle, considerando a possibilidade do insucesso da primeira opção, apresentou-se três condições de Intertravamentos, podendo ser alternados entre si como variável para o efetivo controle automático. Assim sendo, elaborou-se as estratégias de controle, apresentando-as na época aos engenheiros, Luiz Paulo, gerente da Divisão de Elétrica e Instrumentação e Controle, e Eurico, gerente de processo, o croqui, também subscrito por eles (FIG. 3), com as três possibilidades de Intertravamentos para o efetivo controle. Posição 01, acionamento da água manipulada pela pesagem continua do minério de alimentação do Moinho, transportado por correia. Posição 02, acionamento da água, comutada pela densidade medida pelo radioativo na saída do moinho, caso ela venha existir. Posição 03, acionamento da água, pela densidade calculada e medida indiretamente dentro do moinho. A estratégia, posição 03, teve por base um novo algoritmo de cálculo, solucionado analogicamente, pois na época pouca se conhecia de PLC ou computador de processo.

Saindo do moinho, a polpa segue para o tanque de homogeneização, descendo por gravidade conforme figura 3. Ainda na figura 3, pode-se notar o grau de complexidade dos cálculos para se chegar ao sinal eletrônico equivalente a uma densidade que se traduz numa dimensional como sendo, tonelada por metro cúbico (t/m^3). Esse sinal é então enviado para a chave de comutação, posição 03 que o envia como *set-point* remoto (RSP) para controlador FIC-104 que comanda

automaticamente a admissão da água, (*head water*). Ainda, aproveitando parte dos cálculos realizados, se acrescentou no conjunto de processamento analógico, mais cálculos com cartões analógicos, determinando-se assim, a massa circulante no processo em termos de tonelada hora (t/h), e seu respectivo registro.

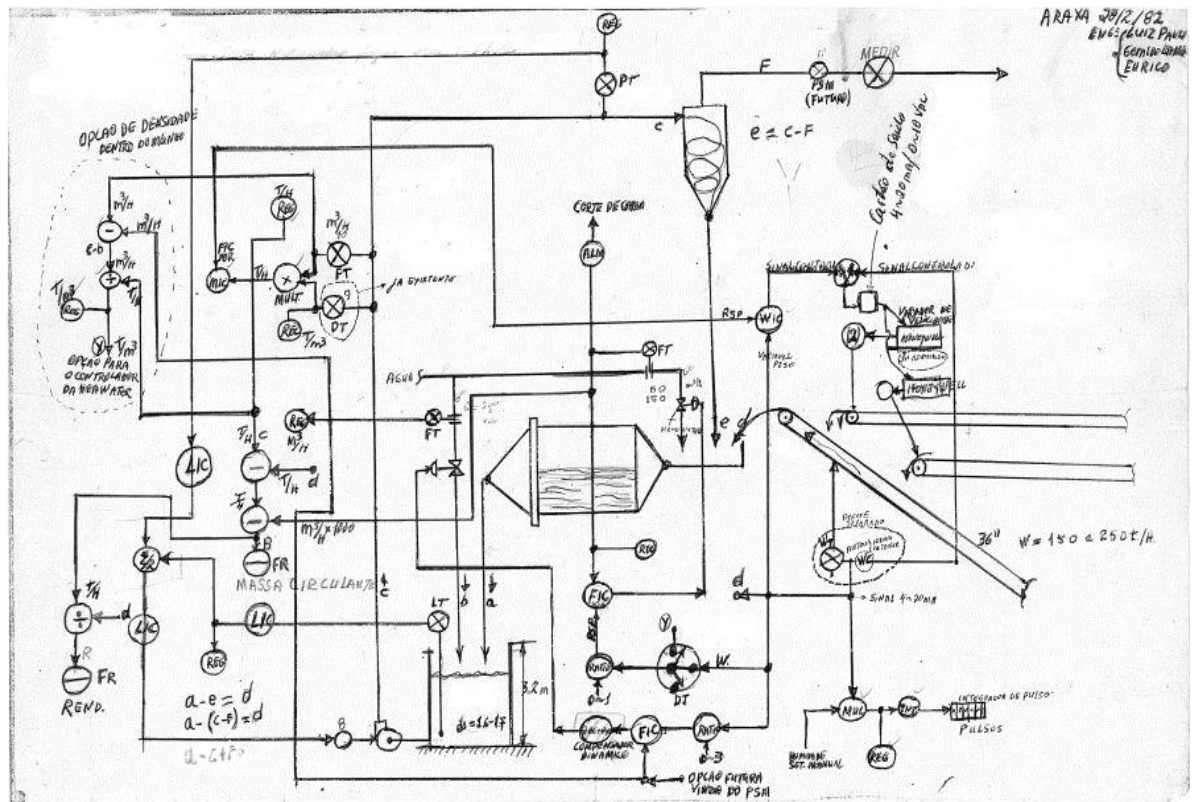
A partir da massa circulante, com mais um novo cálculo, permitiu-se determinar o rendimento da moagem e seu respectivo registro em tempo real, o que proporcionou o devido acompanhamento pelos operadores, o rendimento máximo da moagem. A figura 4 mostra e representa apenas a estratégia de cálculo da densidade interna do moinho. O croqui representado na figura 3 é o trabalho original, datado de fevereiro de 1982, apresentado como proposta estudada, contendo a estratégia inovadora, (**única no mundo**), na época, estudada para medição da densidade interna do moinho de bolas da Cia. CBMM-Araxá - MG.

A partir do trabalho elaborado com as respectivas sugestões, de intertravamento, para o efetivo controle automático, a proposta foi amplamente discutida, analisada e aprovada. Com a aprovação geral, todo o pacote de equipamentos de medição e controle da linha eletrônica modular, SPEC-200, (*simplified package of eletronic controler*) fabricado pela Foxboro Inc.-USA, foi adquirido, implantado, montado e estartado.

Por se tratar de um projeto de controle da densidade, dentro do moinho de bolas, até então inédito, naquela época, por sugestão e interesse da CBMM e dos engenheiros mencionados nessa dissertação, estávamos os três indicados para apresentar a estratégia de controle do moinho para o principal comprador internacional de Nióbio da época que era a Rússia, compradora de quase 70% da produção. Na atualidade, o maior comprador é a China.

Por estar na época instalado no País uma ditadura militar, onde existia o tal de compulsório para viagens ao exterior e ainda por se tratar de viagem à Rússia comunista, o plano depois de analisado, foi descartado pela presidência da empresa CBMM sediada em São Paulo – SP.

Figura 3 – Diagrama do controle moinho de bolas – CBMM - Araxá

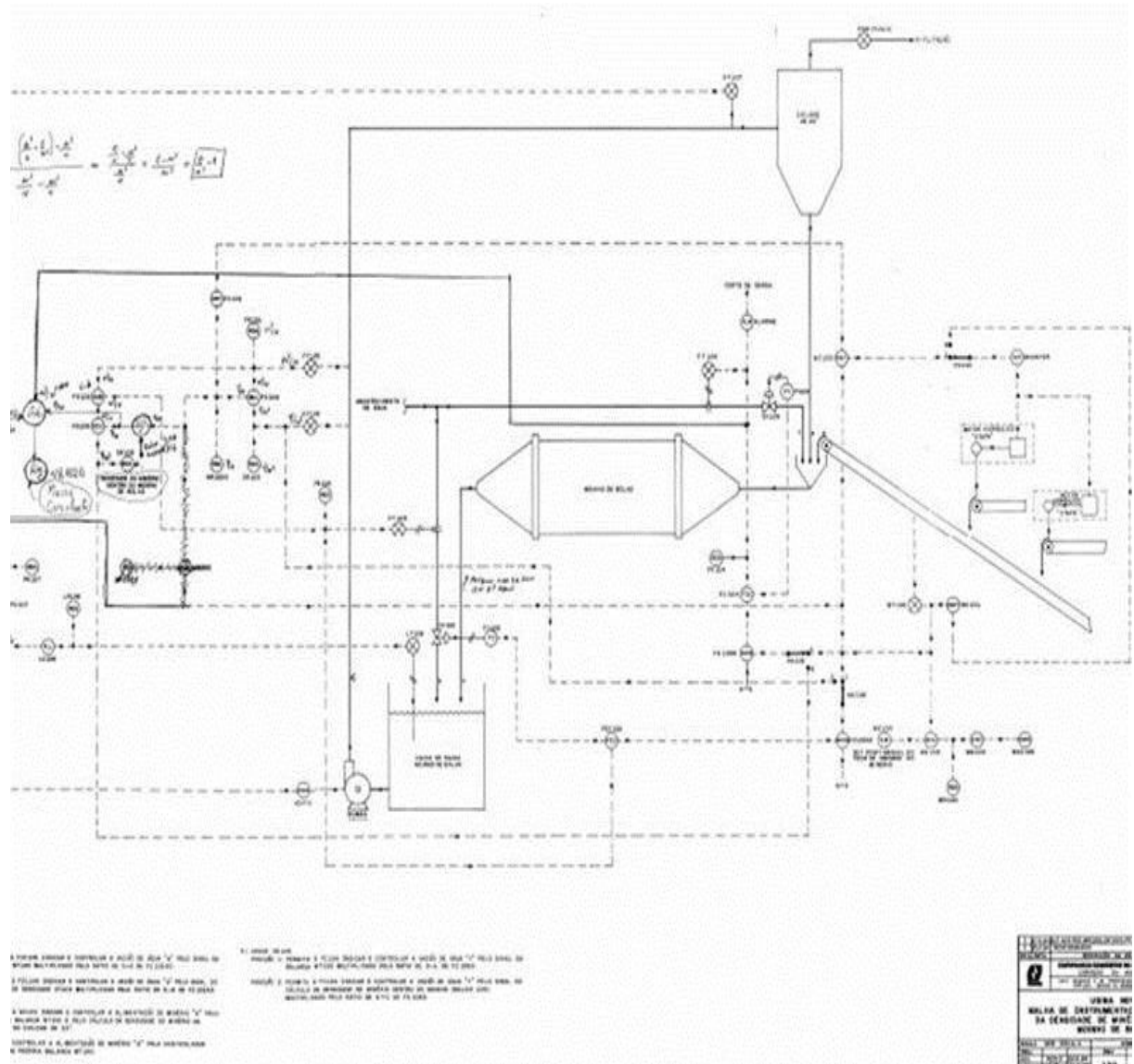


Fonte: Elaborado pelo autor, 1982

A estratégia de medição e cálculo da densidade reinante e , em movimentação dentro do moinho esta elaborada e contida no esquemático da figura 3, aqui preservada por se tratar historicamente de um fluxograma com a originalidade da época. Nele pode-se observar que é necessário utilizar sinais dos 04 transmissores do processo e 03 cartões algébricos analógicos para o cálculo real da densidade interna do moinho em operação. Após os cálculos em tempo real o sinal equivalente vai para o controlador “FIC” como “set point” remoto, resultando a partir do controlador, sinal controlado de saída que modulará a válvula de controle da adição de agua para o moinho, segundo demanda necessária, ajustando continuamente a densidade interna da moagem.

O fato de citar o moinho de bolas, como um agente de processamento, que tem a polpa como produto final, foi indiretamente mentalizar que a densidade na mineração é uma variável muito impactante no processo de concentração do minério, que no seu estado “*in natura*”, sempre está associado à Sílica e outros tipos de rejeito que devem ser separados no processo de concentração, inicialmente pela moagem e posteriormente separação pela flotação.

Figura 4 – Fluxograma do controle Moinho de Bolas, CBMM-Araxá



Fonte: Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração CBMM

O fluxograma acima, Fig. 4, datado de 25/04/84, construído e legendado como propriedade da CBMM, (não podendo ser copiado, cedido ou usado sem autorização), é praticamente uma cópia fiel do original elaborado anteriormente, Fig.3, subscrita também pelos engenheiros da CBMM, Luis Paulo e Eurico tendo em

Figura 6 - Tanque de Homogeneização-Vale



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 - Tanque de Homogeneização-Vale



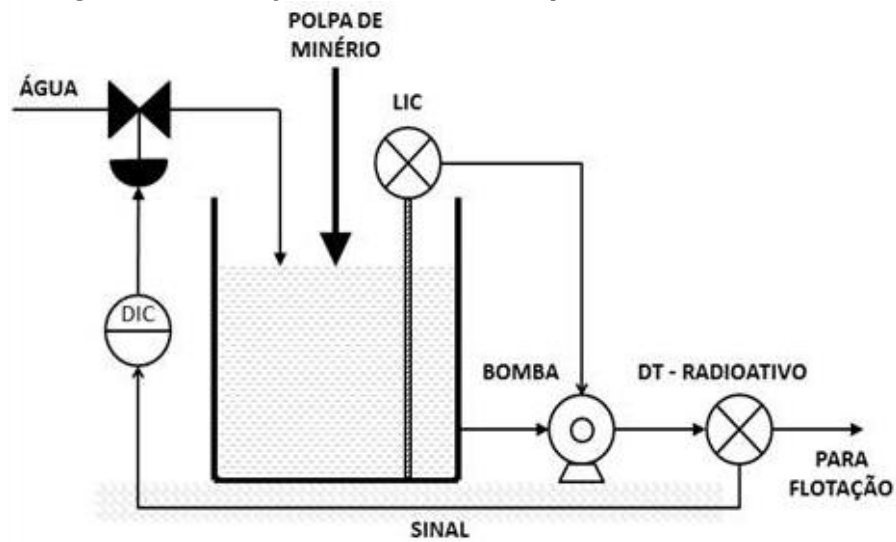
Fonte: Elaborado pelo autor

Os tanques em apresentação nas fotos, com vista frontal e lateral (Fig. 6 e Fig. 7), entre todos os demais tanques em operação na Usina Vale, é o de menor diâmetro, com uma altura de aproximadamente 06 a 08 metros. Por ser o mais crítico em termos de medição e controle, foi escolhido pela Cia. Vale para a instalação do referido medidor MD-01LP. Na saída bombeada do tanque, visto por meio de uma tubulação ascendente de +/-150 mm de diâmetro (FIG. 5), encontra-se instalado, o medidor de densidade radioativo, mostrado em primeiro plano da foto, na cor vermelha, com identificação por meio de placa, sinalizando a radioatividade. Ele será o agente comparador da nossa medição feita pelo MD-01LP instalado na base do tanque.

Na escada de acesso, além de uma nova placa indicando a radiação, uma corrente de isolamento impede a subida de operadores e ou pessoas não autorizadas. Atrás da tubulação, onde fica instalado o medidor radioativo, está a vista do tanque propriamente dito. A locação e instalação dos nossos elementos primários da medição, nível e pressão, principalmente a cápsula, ficará por conta da Cia. Vale, com nossa supervisão, interligação, programação e “**start up**”.

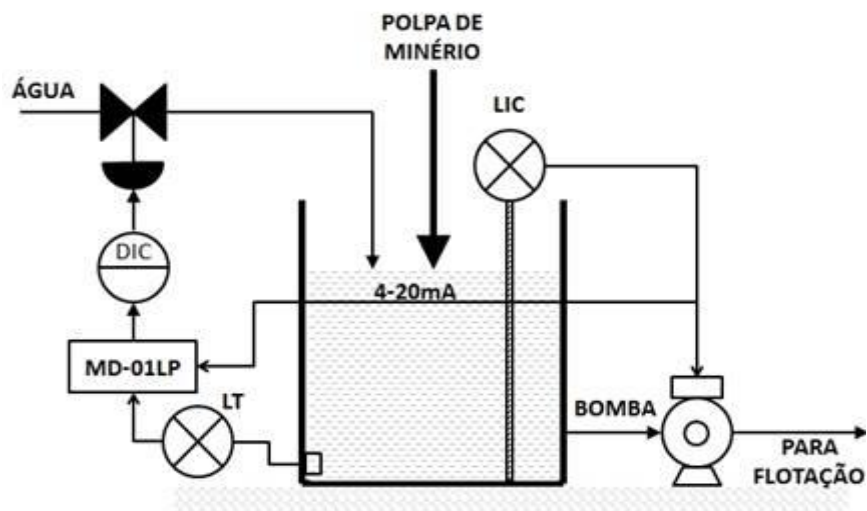
A figura 6 representa exatamente a instalação ou montagem do medidor de densidade radioativo posterior ao tanque de homogeneização na tubulação através da qual a polpa é bombeada, ascendentemente com medição de sua vazão e a respectiva densidade. No esquemático da figura 8, tem-se a representatividade do medidor radioativo instalado, posterior a saída do tanque, medindo e transmitindo sinal equivalente para o controlador (DIC), “**controlador indicador de densidade**”, que manipula a água necessária para a obtenção da densidade desejada.

Figura 8 - Medição da Densidade processo Radioativo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 - Medição da Densidade processo MD-01LP



Fonte: Elaborado pelo autor

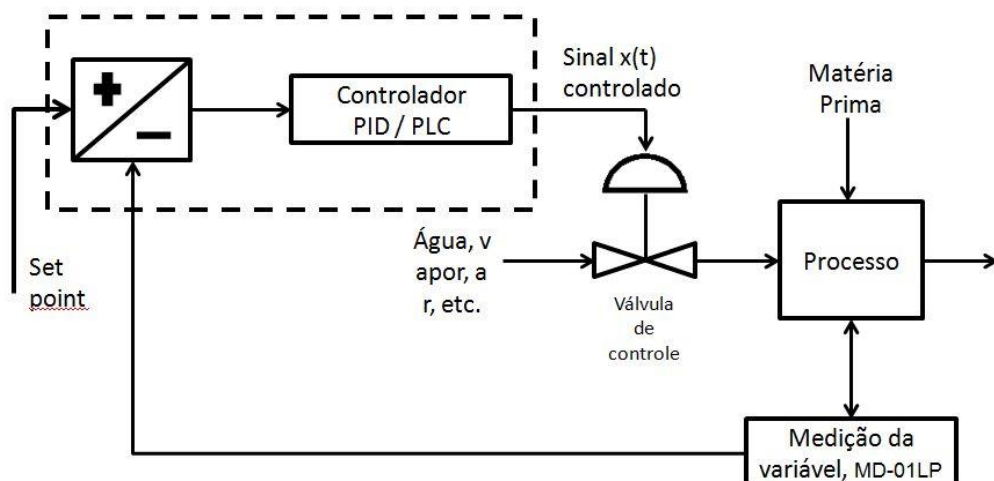
A figura ou esquemático, (Fig. 9), representa nossa proposta de instalação do medidor MD-01LP, medindo em tempo real, a densidade dentro do tanque de mistura e homogeneização. A partir dessa medição que se tem início de todos os cálculos através do algoritmo analógico representado na figura 5 para se chegar a determinação da densidade interna do moinho dinamicamente operando.

É de se notar a grande diferença de estratégia de localização na medição pelo equipamento radioativo versus a medição pelo MD-01LP. A figura 6, foto, ou esquemático da figura 8 ilustram a realidade de uma medição radioativa da densidade, que está fora do tanque de equalização, contra uma medição da densidade exatamente onde ela acontece, ou seja, dentro do tanque de mistura e homogeneização (FIG. 9).

A condição da medição da densidade, quando bem posterior à homogeneização, pode provocar retardo no controle, causando oscilações indesejáveis ao processo. A figura 9 é exatamente a nossa proposta de medição da densidade diretamente dentro do tanque. Cumpre ressaltar que a medição da densidade, acontecendo em tempo real, no processo, facilitará de imediato o seu controle.

Considerando os controladores, PID (proporcional, integral, derivativo), na sua particularidade, denominado DIC, FIC, LIC e outros, no processo de controle de densidade do moinho ou mesmo, da polpa do minério a ser homogeneizado, representa-se nesse contexto o esquemático operacional de um controlador PID representado pela figura 10.

Figura 10 – Esquemática de um controle de processo



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 10, o Sinal da medição realizada e transmitida pelo MD-01LP segue para o controlador PID que compara o sinal denominado sinal da variável do processo com o sinal desejado, denominado “**set point**”. Da comparação resultará

um sinal de erro que entra no controlador PID que manipula e processa o sinal, resultando como saída sinal controlado que modulará a válvula de controle, denominada elemento final de controle. Nesse contexto, tem-se um loop fechado, (mede, transmite, compara e controla o processo).

A equação matemática imposta no processamento do sinal de entrada (erro), tem como resultado um sinal de saída representado pela equação abaixo;

$$x(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \frac{d}{dt} e(t) \quad 04$$

Definindo $x(t)$ como sinal de saída controlado, o algoritmo PID pode assim ser definido, representado ou escrito;

Kp = ganho proporcional, ajustável

Ki = ganho integral, ajustável

Kd = ganho derivativo, ajustável

e = erro, diferença entre o valor desejado (set point) e a variável

t = tempo

τ = tempo de integral.

$Kp \cdot e(t)$ = ação de controle proporcional

$Ki \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \frac{d}{dt} e(t)$ = ação de controle integral mais ação derivativa

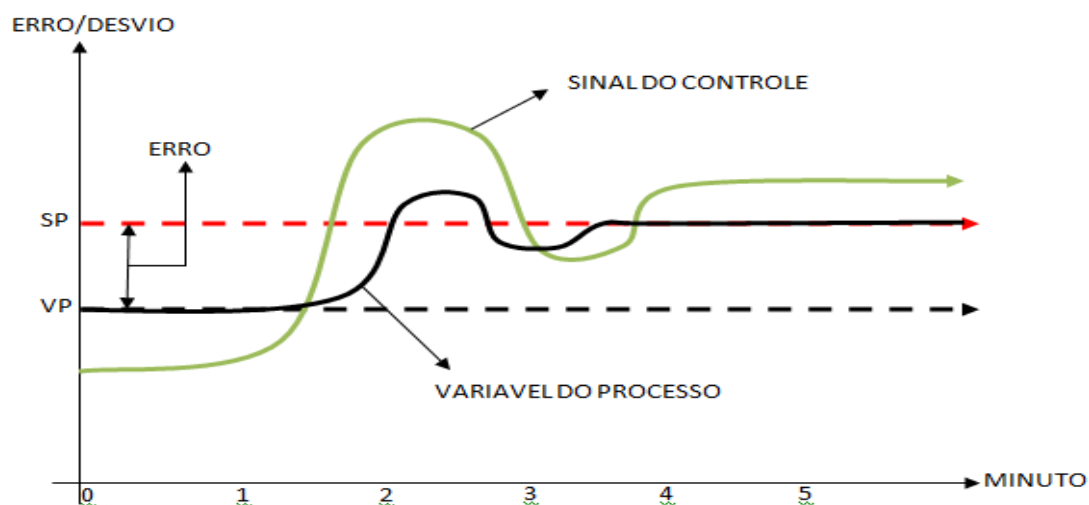
Kp , definido como ganho pode variar de 0 a 50, por exemplo.

Ou ainda, ser definido como faixa proporcional, $Kp = \infty\%$ a 2% .

Exemplo; Variável medida estando com uma diferença de 1 unidade em relação ao SP, e constante de proporcionalidade Kp fixada ou ajustado com ganho 1 ou faixa proporcional 100%, a saída de sinal controlado terá um incremento de 1 unidade sobre o valor anteriormente da saída. Por outro lado, se o ganho Kp estiver ajustado para ganho 0,2 equivalente a uma faixa proporcional 500% a saída reagirá nesse caso com um incremento de apenas 0,2 unidades sobre a variável controlada. Quanto aos outros dois parâmetros da equação, Ki = ganho integral e Kd = ganho derivativo, suas funções ou ações de controle coadjuvantes, agirão de forma distinta quanto ao erro. No caso integral a ação de controle dessa ação, agirá integrando o valor do erro até que ele não mais exista. Já a ação derivativa, somente agirá com base na taxa de variação do erro, ou seja, proporcional a velocidade de sua variação. O erro poderá existir porem, se ele não variar a ação de controle derivativo não causará nenhuma ação ou incremento na saída. O valor de ajuste da constante

K_i =constante de integração é ajustado como repetições por minuto ou às vezes, como minutos por repetições. Já o ajuste K_d =ganho derivativo, também baseado no tempo, atuará no sistema de controle, aumentando ou diminuindo a saída, fazendo com que esse reaja fortemente e rapidamente a variação do erro. Havendo erro, porem, sem variação da variável a ação derivativa não atuará. Na pratica o tempo derivativo K_d deve ter como ajuste um valor muito pequeno ou na maioria dos casos de variáveis como pressão, vazão e outras que reagem com um tempo de resposta muito rápido, é de bom procedimento que ele, derivativo, seja desabilitado ou então ser ajustado com um valor muito pequeno. Na hipótese do controle de temperatura, PH ou mesmo controle de nível em tanques de grande capacitância, onde o tempo de resposta para essas variáveis sejam lento, o derivativo quando bem sintonizado oferece uma grande melhoria na ação de controle, ajudando a retornar mais rapidamente a variável ao seu ponto de controle.

Figura 11- Curva de ação e resposta de controle



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 11 representa uma curva de resposta típica da ação de um controlador PID quando bem sintonizado e aplicado ao processo.

A polpa de minério estando dosada e controlada passará para sua etapa derradeira, qual seja, sua concentração propriamente dita, no processo de flotação onde se retira a parte indesejável, sílica e a terra associada em forma de barro. Por outro lado, quando se tratar da polpa, (Fe_2O_3), concentrada, sua densidade também

é controlada para fins de transporte e ou disponibilizada para processos mais nobres, como por exemplo, a venda, sinterização, politização ou até mesmo, para o transporte via mineroduto, como acontece na Samarco mineração, localizada no distrito de Mariana - MG, recalcando a polpa com densidade controlada para o Estado do Espírito Santo.

Para o transporte via mineroduto, a medição e o controle da densidade, torna-se crítico, pois dela depende o bom desempenho da operação das bombas de recalque, assim como, o bom desempenho do mineroduto, pois este tem como atributo, para sua boa operação e, longevidade, a velocidade do escoamento e a respectiva densidade, **(+/-1.5m/s e 2.035kg/m³ máximo)**, (BOZZOLA, 2016). Com o controle dessas duas variáveis, minimizam-se os problemas de sedimentação e entupimento assim como, desgaste prematuro do mineroduto.

No caso particular do controle da densidade, para o bombeamento, em grandes Mineroduto o medidor de densidade MD-01LP também se aplica onde o controle da densidade em tanque a montante da bomba de recalque se faz necessário. Tanto na figura 8, quanto na figura 9, a medição do nível do tanque e, seu respectivo controle, é de extrema necessidade. O processo de controle do nível pode ocorrer, tanto pelo controle da rotação da bomba de recalque da polpa, assim como, pela manipulação da adição da água no respectivo tanque. Já a medição propriamente do nível, pode ser feita por vareta capacitiva, medidor ultrassônico, radar, medidor por onda guiada, etc. Por outro lado, a célula que medirá o nível de baixo para cima, ou a altura manométrica, é feito por célula piezo resistiva especial, instalado bem próximo à base do tanque, observando-se o cuidado com seu posicionamento, evitando assim a deposição de particulados em sua membrana, ou ainda, com outro tipo de célula especial, também piezo resistivo, projetada para ser alocada e ou inserida de cima para baixo com cabo especial de alimentação elétrica, ficando bem próximo à base do tanque, ou ainda, para o mesmo fim, pode ser utilizado o tradicional borbulhador.

A figura 8 e 9 é esquemática representativa da medição da densidade fora do tanque de homogeneização, processo radioativo e, dentro do tanque de homogeneização, processo direto. As figuras 27, 28, 29 e 30 são fotos do medidor transmissor ultrassônico, transdutor com cápsulas piezo resistiva de nível ou pressão, e o borbulhador. Tratando-se do borbulhador, ele deverá ser utilizado na medição do nível para teste de homologação em um dos 16 tanques existentes na

mineração Samarco. Na Cia Vale, será usada a célula piezoresistiva Jumo, fig.28, instalado em condições especial próxima a base do tanque da Figuras 25 ou 26.

3.1 Literatura e Estado da Arte

Várias são as empresas que desenvolveram ou estão desenvolvendo equipamentos com o fim de medir e transmitir sinal equivalente à densidade medida. Um dos mais antigos medidores de densidade, nessa linha de medição de particulado é o radioativo que ainda hoje, é o medidor mais utilizado, fabricado pela Kay Ray Americana. Na mineração, não fosse seu grau de periculosidade, sua utilização seria de difícil superação. Vários outros fabricantes têm desenvolvido medidor radioativo com a finalidade de medição de densidade, entre outros, especialmente, como é o caso das empresas; Vega Instrumentos S/A, Hefei Haiming Sci.&Tech. Co. Ltd., MS Instrumentos Ltda, Kay Ray 3680 – Smart Density Transmitter, Endress+Hauser Group, Instrumentos Lince Ltda, etc.

Na literatura científica, é possível atualmente ler muitas pesquisas de técnicas para a medição da densidade de materiais em varias aplicações. Amiri e outros (2016) fazem um estudo sobre métodos de medição de densidade para fibras de linho; o objetivo deste projeto de pesquisa é estabelecer um método de teste padrão para medir a densidade de fibras de linho usando o método de Arquimedes (flutuabilidade). Diferentes fluidos de imersão foram considerados na medida de densidade de fibras de linho com e sem o uso de forno de vácuo. Os resultados dos testes de picnometria de gás da mesma amostra de linho foram utilizados como comparação para comprovação. Variáveis como tamanho de amostra, pressão de vácuo, tempo de vácuo e tipo de fluido de imersão foram estudadas pelo teste de robustez. Os resultados deste estudo sugerem que o uso de óleo de soja grau certificado como fluido de teste e submergir espécimes de linho em fluido de teste sob pressão de vácuo de 90-100 kPa durante 10 min produzem os valores de densidade mais próximos aos adquiridos pelo método de picnometria de gás.

Em Jaksic, Scarabosio e Meister (2016) usam um filamento do medidor de pressão para medição da densidade do gás neutro usando corrente alternada como fonte de alimentação. Na pesquisa de fusão de plasma, a densidade de gás neutro no interior do vaso é frequentemente medida utilizando indicadores de ionização

catódica quente que são modificados para a aplicação em campos magnéticos elevados e para uma gama de medição entre 10.3 Pa e 20 Pa. Para obter uma emissão de elétrons suficiente; é aquecida a altas temperaturas de 1800 K por aquecimento direto de resistências elétricas. Para compensar as forças de Lorentz induzidas, o filamento deve ser relativamente espesso para proporcionar uma estabilidade mecânica suficiente que implica uma subida das correntes de aquecimento até 20 Amper. A corrente de aquecimento pode ser reduzida utilizando um filamento mais fino em combinação com uma corrente alternada com uma frequência escolhida de preferência para reduzir os esforços mecânicos. O benefício de tal técnica é além de poupança de energia de aquecimento, especialmente economia de espaço, aplicando cabos de alimentação mais finos. Para estimar a adequação de tal solução, realizou-se um estudo de viabilidade por meio de métodos numéricos. O assunto principal da investigação foi o filamento quente para o qual a corrente alternada foi utilizada como fonte de energia.

Wiedey e Kleinebudde, (2017) pesquisam a técnica termográfica infravermelha com uma nova abordagem para medição de densidade em linha de fitas produzidas a partir de compactação em rolo. A densidade relativa da fita é um dos principais atributos de qualidade durante a compactação do rolo / granulação a seco, uma vez que determina principalmente a porosidade dos grânulos e a distribuição do tamanho dos grânulos. Neste estudo, foi investigada uma nova abordagem para medir a densidade relativa da fita em linha. Uma câmera termográfica foi usada para gravar fitas produzidas recentemente quando deixaram a lacuna. Num primeiro passo foi comprovada uma correlação principal da temperatura da fita medida com a densidade da fita. Além disso, a taxa de arrefecimento após a compactação foi identificada como uma característica adicional que pode ser utilizada para determinar a densidade da fita. Interessantemente, as imagens termográficas também revelaram distribuições de temperatura dentro da fita que poderiam ser reproduzidas com distribuições de densidades, medida pela tomografia X-raio micro-computada. A seguir, foram ainda investigadas as características adicionais que são igualmente importantes para a aplicação prática como uma ferramenta de medição em linha. A técnica mostrou tempos de reação curtos às mudanças no processo e em um experimento de longo prazo não foi detectada nenhuma deriva de temperatura ao longo do tempo. Este estudo

demonstrou a aplicabilidade de uma câmera termográfica como uma ferramenta analítica em linha para a determinação da densidade relativa da fita.

Wang, Threatt e Vargas (2016) pesquisam a determinação de parâmetros de solubilidade a partir de medições de densidade para hidrocarbonetos não polares a temperaturas de (298-433) K e pressões até 137 Mpa. O parâmetro de solubilidade de Hildebrand, dá uma representação quantitativa do conhecido aforismo "semelhante dissolve" para líquidos hidrocarbonetos não polares. Isto é de grande importância comercial para certos polímeros e misturas de hidrocarbonetos. No entanto, os parâmetros de solubilidade estão normalmente disponíveis apenas em condições ambientais para um número limitado de substâncias. A extrapolação desses parâmetros para condições de alta pressão e alta temperatura não é atingida por correlações empíricas comuns ou equações cúbicas de estado. Neste trabalho um conjunto de equações é derivado de relações fundamentais das propriedades termodinâmicas para considerar a dependência de pressão e temperatura deste parâmetro de energia coesiva. O método proposto proporciona uma nova abordagem para uma determinação rápida, simples e precisa dos parâmetros de solubilidade a temperaturas e pressões elevadas para hidrocarbonetos não polares utilizando medições de densidade.

Pustogvar e Kulyakhtin (2016) estudam medições da densidade do gelo marinho. A densidade do gelo marinho é um importante parâmetro de engenharia e geofísica. No entanto, ele não tem um método padrão de medição. Este trabalho mostra que o método de pesagem hidrostática é o melhor método disponível que pode capturar a variação natural da densidade de gelo ao longo da espessura do gelo abaixo da linha de água. O método de pesagem hidrostática tem uma menor incerteza de mensuração (0,2%) em comparação com o método massa / volume mais comum, que tem uma incerteza de 4% quando aplicada a amostras de gelo com comprimentos e diâmetros de 70 mm. A densidade de gelo de primeiro ano abaixo do nível de água medido pelo método de pesagem de equilíbrio no presente estudo situa-se numa gama de 894-921 kg/m³. Este estudo demonstra a grande quantidade de técnicas recentes sendo usadas para a medição da densidade.

Zhao e outros (2017) estudam a sensibilidade de medição de densidade de micro-cantilevers influenciada pelas dimensões da forma e modos de operação. As simulações acopladas de fluido-sólido foram desenvolvidas para analisar a sensibilidade de medição de densidade (DMS) de micro-cantilevers ressonantes

com diferentes formas, dimensões e modos de operação. As fórmulas analíticas foram estabelecidas para ilustrar a relação de deslocamentos de frequência de ressonância e densidades de fluidos de trabalho. As análises de simulação de fluido-sólido acopladas e os resultados experimentais foram utilizados para estudar os efeitos de micro-cantilevers com diferentes dimensões no DMS sob modos de flexão e torção. As influências de micro-cantilevers com formas diferentes no DMS foram também discutidas e analisadas. Conclui-se que o comprimento e a largura da extremidade livre do micro-cantilever, bem como o modo de operação, são os principais fatores que afetam o DMS. Além disso, o método acoplado de fluido-sólido simulação proposto é uma instrução importante no aspecto do projeto de micro-cantilever. Por último, foram analisadas a estabilidade de frequência e a resolução do sensor, para melhor compreender o desempenho do sensor.

Ren e outros (2017) pesquisam os efeitos do desalinhamento da sonda nas medições da densidade de fluxo da seiva e nos métodos de correção do espaçamento da sonda. A medição precisa do fluxo de seiva é importante para estimar a transpiração. Este trabalho é focado nos erros na densidade de fluxo da seiva causada pelo desalinhamento da sonda e na forma de reduzir esses erros. Descobri-se que o desalinhamento da sonda causou erros na velocidade do pulso de calor. Além disso, o alinhamento de problemas teve uma grande influência na difusividade térmica E na determinação de pontos de vazão zero. Assumindo condições uniformes de difusividade térmica axial e zero de fluxo de seiva, desenvolvemos um novo método de correção de espaçamento in situ baseado em três medidas de sensores de temperatura dentro da mesma temperatura Sonda, que pode ser usada para corrigir desalinhamentos lineares e não-lineares. Resultados laboratoriais experimentais verificaram que o método poderia reduzir significativamente os erros nas determinações de J usando o método de Compensação de Pulsos de Calor (CHP), o método de Razão de Calor (HR) e o T-maxmethod.

Ross e Bourke (2017) estudaram a medições de densidade com a atenuação de raios gama de alta resolução em núcleos de perfuração de exploração de mineração, incluindo núcleos cortados. As medidas de propriedade física são cada vez mais importantes na exploração mineira. Para determinações de densidade em rochas, um método aplicável em núcleos de perfuração de exploração baseia-se na atenuação de raios gama. Este método não destrutivo é ideal porque cada medição

leva apenas 10s, tornando-o adequado para alta resolução log. No entanto, a calibração tem sido problemática. Neste artigo apresentam-se novas equações empíricas de correção de sítios específicos para núcleos NQ e BQ inteiros. As correções forçam as densidades gama para os valores "verdadeiros" estabelecidos pelo método de imersão. Para o calibre do núcleo NQ, a faixa de densidade se estende até valores elevados (pirita maciça, 5g /cm³) e a correção é pensada para ser muito robusta. Também se apresentam fatores de correção empírica adicionais para núcleos de corte que levam em consideração o material que os acompanha. Estes "fatores de correção do núcleo de corte", que não são específicos do local, foram estabelecidos através da realização de medidas de densidade gama em cilindros de alumínio truncados de várias espessuras residuais.

Arman e Okada (2016) pesquisaram medições de densidade de carvão gaseificado e de escória sintetizada. As densidades de fundições de escória de carvão fundido novamente foram medidas em ar utilizando o método de arco duplo de Archimedeian na gama de temperaturas de 1350 a 1600 ° C. As escórias constituídas pelos componentes principais com variações sistemáticas de composição foram sintetizadas e avaliadas para comparação. A densidade diminuiu linearmente com o aumento da temperatura para todas as amostras de fusão. Verificou-se que a densidade de fundições de escória de carvão gaseificadas e sintetizadas decresce com o aumento dos teores de Al₂O₃ e SiO₂ e aumenta com o aumento dos teores de Fe₂O₃ e FeO. Um parâmetro de composição calculado a partir da composição química foi proposto para prever a densidade de fundições de escória de carvão. A relação entre a densidade medida e o parâmetro de composição foi analisada.

Remiorz e Ostrowski (2015) pesquisaram um instrumento para a medição da densidade de um líquido que flui em uma tubulação. Este trabalho apresenta um sistema de medição da densidade de um líquido que flui em uma tubulação com base em uma medida quase-hidrostática. Um conceito de um medidor de densidade é discutido. Uma descrição física e matemática da nova solução são apresentadas juntamente com uma avaliação das perdas de pressão ao longo da seção de medição e os resultados da modelagem numérica da seleção do parâmetro de projeto. Além disso, o protótipo do medidor que foi testado na indústria do açúcar é apresentado. O medidor é destinado a medições industriais de densidade de líquidos e soluções de líquidos que fluem em uma tubulação e automação de

instalações para separar, combinar ou concentrar soluções líquidas. Este instrumento poderia ser de especial importância em áreas como as indústrias de alimentos, petróleo ou química para realizar medições de densidade e para corrigir a densidade variável em medições de vazão.

Sobrino e outros (2016) pesquisaram sobre as medições de viscosidade e densidade de aminas aquosas a altas pressões: MDEA-água e misturas MEA-água para captação de CO₂. Viscosidade e densidade são propriedades termo físicas cruciais para caracterizar qualquer tipo de fluido, tais como aminas aquosas. Estas misturas estão a tornarem-se cada vez mais relevantes para o seu potencial de captura de CO₂, de modo que ter medições precisas de viscosidade e densidade seria útil. As densidades e viscosidades destas misturas à pressão atmosférica podem ser encontradas na literatura, embora seja mais difícil encontrar valores a altas pressões, o que pode ser interessante quando se procura fornecer uma descrição completa destes fluidos. Neste trabalho são apresentadas medidas de viscosidade e densidade a altas pressões (até 120 MPa) e a temperaturas entre 293,15 K e 353,15 K de água MDEA + e misturas MEA + água (ambas de 10% a 40% de massa de amina). Foi utilizado para medir as viscosidades a altas pressões devido à sua robustez em termos de corrosão. Os detalhes deste último equipamento são apresentados, incluindo a calibração e cálculos de incerteza, que dão uma incerteza expandida relativa ($k = 2$) menor que $\pm 2,4\%$ para a viscosidade mais alta e $\pm 2,9\%$ para o mais baixo.

Abdulagatov e outros (2016) estudaram processos de medidas da densidade, velocidade do som, viscosidade e propriedades termodinâmicas derivadas dos fluidos geotérmicos do sul da Rússia em campo geotérmico. Densidade, velocidade do som, viscosidade de fluidos geotérmicos naturais do sul da Rússia em campos geotérmicos (Dagestan, costa do mar Cáspio) foram medidos na faixa de temperatura de 277 e 353K à pressão atmosférica. As medições foram feitas utilizando o densímetro Anton Paar DMA4500 e o visco densímetro Stabinger SVM3000 para quatro amostras de fluido geotérmico dos vários poços de alta pressão Izberbas (N ° 68 e 129), Ternair (N ° 27T e N ° 38T). Foi utilizado um analisador de velocidade de som (Anton Paar DSA 5000) para medir simultaneamente a velocidade do som e a densidade das mesmas amostras de fluido geotérmico. As diferenças médias entre as densidades e viscosidades dos fluidos geotérmicos medidos e os valores da água pura (formulação IAPWS) estão

dentro de (0.1 e 1.77)% e (0.13 e 2.1)%, respectivamente, os quais são consideravelmente mais altos do que suas incertezas experimentais. A previsão da densidade e viscosidade das soluções aquosas de cloreto de sódio, com base nos modelos desenvolvidos, foi muito próxima das suas incertezas experimentais (dentro de 0,03% para a densidade e 1,56% para a viscosidade). As propriedades medidas à pressão atmosférica têm sido utilizadas como dados de referência para a previsão do comportamento termodinâmico de alta pressão.

Furtado e outros (2016) pesquisaram a importância do uso de materiais de referência adequados em medidas de densidade realizadas em tratamentos de hemodiálise. Na hemodiálise, são utilizados medidores de densidade de oscilação para medir a densidade do componente ácido das soluções de diálise utilizadas no tratamento de pacientes renais. Uma determinação de densidade incorreta desta solução utilizada em tratamentos de hemodiálise pode causar vários problemas adversos aos pacientes. Portanto, apesar do controle rigoroso da Fresenius Medical Care dos resultados da calibração dos medidores de densidade, este estudo mostra os benefícios de mimetizar a matriz normalmente medida para produzir materiais de referência adequados para as calibrações do medidor de densidade.

Todos estes trabalhos ajudaram no desenvolvimento da metodologia de medição de densidade proposta na dissertação. Sem a aplicação voltada para a mineração de ferro em Minas Gerais. Observa-se a riqueza e variedade de aplicações e métodos de medições de densidade, além da atualidade do tema.

Outras tecnologias que não a radioativa, como é o preposto e objetivos fins da **Smar Indústria Eletrônica**, fabricante das células de pressão capacitivas, sediada em Sertãozinho, São Paulo, desenvolveu o sistema de medição de densidade com a própria célula capacitiva, medindo diferencial de nível (FIG. 13), e a partir dessa medição chegou ao cálculo da densidade do meio. O equipamento em si, densímetro modelo DT301 microprocessado, tem um conceito e uma estrutura bem avançada, aliada a um projeto arrojado. Opera na Cia Vale possivelmente já homologado. Todavia, esse equipamento pode ou tem apresentado problemas quando da variação do gradiente do particulado do minério dentro do tanque ou ainda, quando da variação acentuada do nível. Nesses casos a densidade medida, indicada e transmitida pelo DT301 varia, particularmente no caso da polpa de minério, pois o equipamento em princípio foi desenvolvido para a indústria açucareira, adaptado para a medição em mineração.

ALVES Evaristo Orellana, et all (2013), em estudos realizados sobre a medição de densidade em processos industriais, baseados em diferentes tecnologias, tais como; medidores nucleares, refratômetros, medidores mássicos, medição com diapasão vibrante, aerômetros, análise de laboratório, medidores de ondas guiadas, pressão diferencial, etc., definiu e analisou caso a caso. Segundo Alves, a densidade é um dos melhores indicadores da composição de um produto, sendo usado por Arquimedes (250 anos A.C.) para determinar e informar que a coroa de ouro do rei Hiero não era pura. Das tecnologias referidas pelo autor, apesar de cada qual ter sua particularidade, ressalta que a nuclear e a por pressão diferencial são as mais universalizadas em termos de medição em processos industriais.

BOZZOLA Antonio Ricardo (2015) em artigo técnico apresenta razões da necessidade de um rigoroso processo de medição e controle da densidade da polpa no bombeamento e transporte a grandes distâncias via mineroduto, assim como a velocidade do escoamento. Ressalta ainda como importante, por exemplo, a declividade máxima da tubulação, ângulo de repouso, etc. Observa e considera também que a reologia da polpa deve ser a mais homogênea possível em termos de granulometria e densidade.

SARDINHA Oscar, Antonio Carlos da Silva e Benonil Carneiro (2013) – Mineração Caraíba, em Artigo técnico premiado, publicado pela revista Minério &Minerales desenvolveram densímetro operacional em linha. O projeto destravou a utilização do processo manual de medição, assim como a substituição, nos dizeres da Empresa, os medidores radioativos que geravam por motivo de segurança e manutenções, custos elevados. O princípio básico desenvolvido e empregado por eles, na medição da densidade, foi a célula de carga instalada em tubo by-pass, caracterizando uma medição por pressão diferencial.

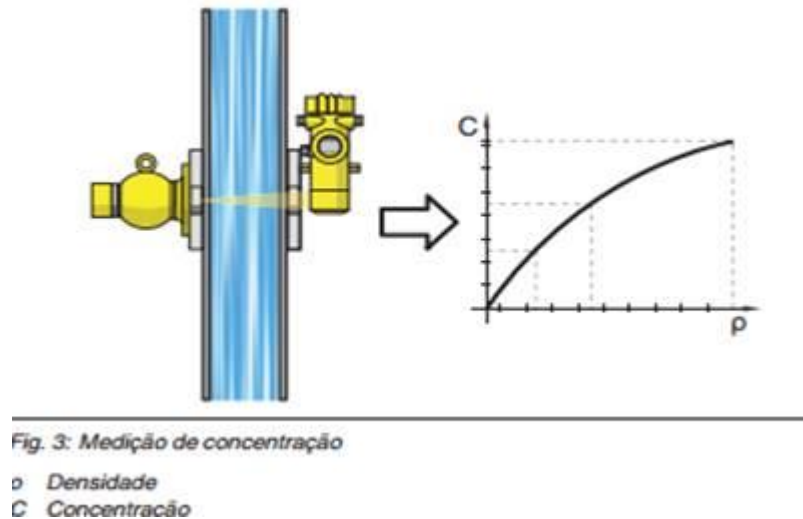
3.2 Medidores desenvolvidos ou em processo de homologação

São medidores de fabricantes de diversas áreas da instrumentação nacional e internacional que estão buscando desenvolver instrumentos a que venha medir a densidade “**em linha**” e também transmitir sinal equivalente à medição para seu apenas seu registro ou controle automático na maioria dos casos da medição. O propósito do desenvolvimento esta no sentido de substituir medidores radioativos,

caros tanto na aquisição como na manutenção, Todavia, a maior preocupação nos atuais radioativos reside no seu trato ambiental e pessoal.

3.2.1 Medidor radioativo

Figura 12 - Medidor radioativo – Vega S/A



Fonte: Elaborado pelo autor

Medidores radioativos, Fig.12 foram e, talvez ainda sejam os mais utilizados no mercado de mineração. Conhecidos a mais de 50 anos nessa área de medição. São robustos, estáveis, repetitivos, confiáveis, permanecendo em operação na mineração até hoje. É relativamente caro. Por outro lado, seu maior problema não está no preço, mas sim na segurança pessoal dos técnicos de instrumentação da usina ou empresa que os adotam, pois atualmente, por segurança somente alguns dos técnicos com treinamento e uniforme especial, (EPI), podem dele se aproximar e intervir na manutenção geral de limpeza, manutenção preventiva programada ou mesmo corretiva preditiva ou ainda nos testes de calibração quando requerido. Por esse motivo, as empresas que dele fazem uso na atualidade, como medidores primários na medição da densidade, estão à procura de alternativas confiáveis e robustas para esse tipo de medição, substituindo de vez os radioativos, que ainda hoje são massivamente utilizados. Nesse tipo de medidor, radioativo, cápsulas de Césio ou Cobalto, emissores de partículas radioativas, (Raios Alfa e ou Gama), atravessam o tubo e a polpa diluída, atingindo o sensor do lado oposto. A quantidade de raios Alfa ou Gama que atravessam o tubo e a polpa é inversamente proporcional à concentração ou densidade da mesma no escoamento. Ou ainda,

podemos dizer que a diferença entre os raios emitidos contra aqueles que atingiram o receptor, é teoricamente o valor da densidade do minério polpa escoante.

Sua característica principal estampada nesse tipo de medidor é a sua exatidão, normalmente 0,15% da faixa de medição entre -40°C a 60°C, segundo catalogo do fabricante.

3.2.2 Medidor de células capacitivas

Figura 13 - Medidor de células capacitivas para nível e ou pressão



Fonte: SMAR, 2016

O medidor da Fig.13 possui duas células de pressão manométrica, capacitivas, instaladas ou submergidas dentro do tanque, numa distância fixa entre si, interligada eletricamente a um transmissor eletrônico de densidade, montado através de um flange na parede externa do tanque. Esse tipo de medidor já vem sendo testado, parcialmente homologado e, em uso em várias empresas do grupo Vale e Samarco. Seu projeto inicial e com sucesso, foi para utilização em indústrias de açúcar e álcool. Com adaptação e programação do software veio a ser testado e utilizado na medição da densidade da polpa. Todavia, tem apresentado alguns problemas quando o nível do tanque varia acentuadamente e, também oscilações na densidade medida quando da existência de variações no gradiente da densidade altimétrica, dentro do tanque. Sua instalação é morosa e cara, exigindo intervenção de corte no tanque do processo, para instalação do carrapato conforme figura 26.

3.2.3 Tomógrafo

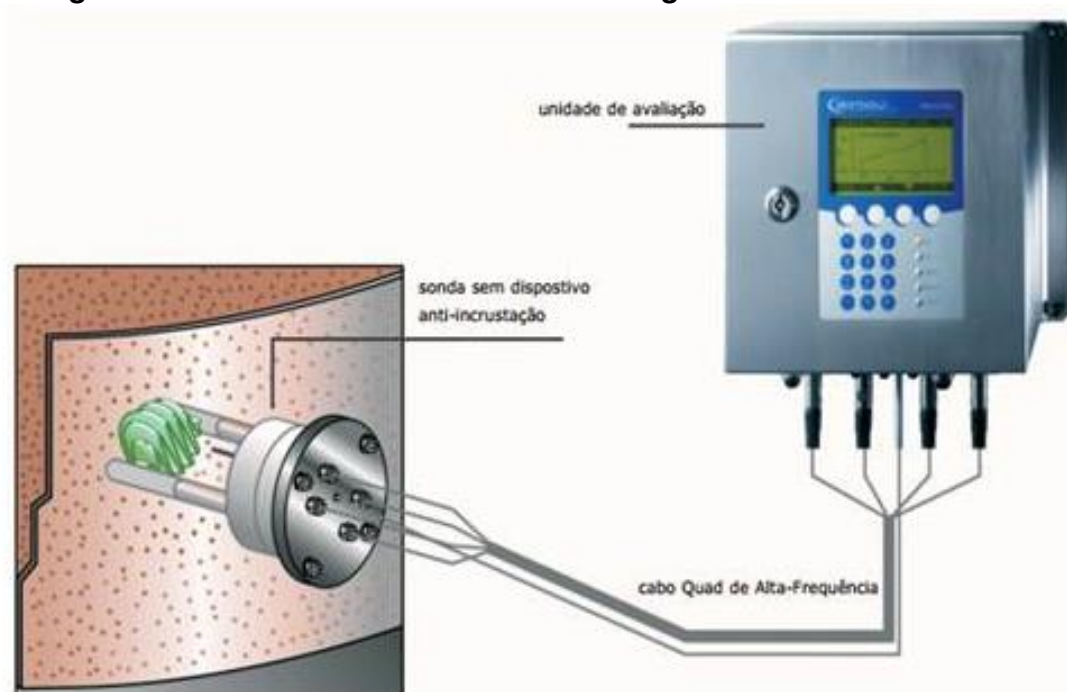
Equipamento utilizado na medicina. Não se tem detalhes formais quanto a sua utilização na mineração. Todavia, o tomógrafo na medicina, entre outras aplicações é usado para o exame de densiometria óssea, que nada mais é que medir a densidade dos ossos a fim de diagnosticar a osteoporose. Com modificações e adaptações, pode ser utilizada para medição da densidade da polpa e talvez a vazão da mesma. Informações mais recentes dão conta que o tomógrafo a ser testado na Cia Vale, não utiliza o princípio raios-X nem tão pouco, cápsula radioativa. Seu princípio de operação se baseia em tecnologias elétricas, a saber:

- a) ERT – Electrical Resistance Tomography;
- b) ECT – Electrical Capacitance Tomography;
- c) EIT – Electrical Impedance Tomography.

Cada uma das tecnologias se aplica a determinadas condições do produto, se líquido ou sólido, condutivo ou não condutivo. Sua origem é inglesa, seu fabricante é a empresa “ITS”, (www.its.uk). O equipamento, segundo informações, está a caminho, sendo esperado pela Cia Vale para testes de homologação. Não se tem ainda informações quanto ao seu desempenho aqui no Brasil. Entretanto, o que se conhece e averigua é a Universidade de São Paulo estudando desenvolver medidor semelhante. Como informação até ao momento presente, dada pelo possível usuário, é seu preço incompatível, muito alto, estando na faixa de 150.000,00 reais. Outra possível dificuldade nesse tipo de medidor é a sua instalação e interligação com o computador. Como ele faz e interpreta uma imagem do produto dentro de um tanque, ou tubulação medindo inclusive a vazão, segundo informação, necessita às vezes, de até 32 eletrodos instalados e correlacionados.

3.2.4 Medidor de densidade por micro-ondas guiada

Figura 14 - Medidor de densidade ondas guiadas- WIKA Controls



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo informações do usuário, esse tipo de medidor de densidade, Fig.14, com solicitação de teste, obviamente também será testado pela Cia Vale. Porém, ainda não se tem informações e detalhes de sua construção, montagem, operosidade e preço. O que se sabe de catalogo, pela Wika Controls é que esse tipo de medidor é usado na indústria sucroalcooleira.

Acredita-se que o medidor, por ter seu elemento emissor físico de ondas guiadas, introduzido na polpa, pode por ela ser impregnado ou até mesmo ser erodido já que a polpa está sempre em movimentação ou profusão dentro do tanque. Assim, provavelmente não terá um bom tempo de vida útil, ou mesmo desempenho com leituras corretas e repetitivas no decorrer de sua operação.

3.2.5 Medidor de densidade por Garfo Vibratório

Figura 15 - Medidor de densidade tipo garfo - Emerson



Fonte: Elaborado pelo autor

Também sendo testado pela Cia Vale. Não se tem ainda informações mais recentes. Seu princípio de funcionamento, baseia-se numa frequência característica e natural de seu garfo que altera a frequência com o produto e sua densidade. Todavia, observa-se que por ser um equipamento, como o próprio nome sugere garfo vibratório, interpreta-se que o equipamento é de natureza mecânica, que ao lidar com polpa, ficará muito susceptível de ter uma vida útil, talvez precária e curta ou mesmo exigir freqüentes manutenções periódicas de limpezas dos garfos ou ainda, pela forte abrasão do processo sobre seus garfos vibratórios, confere-lhe sofrível repetitividade com medidas incorretas em pouco tempo de uso, além de provável incrustação da polpa em seus grafos alterar sua frequência natural.

3.2.6 Medidor mássico Coriolis

Figura 16 - Medidor mássico Coriolis- Emerson



Fonte: Elaborado pelo autor

Esse tipo de Medidor, Fig.16 ótimo para medição de escoamento mássico de líquidos. Também pode ser utilizado para medição de densidade. Foi testado na Cia Vale para a medição da concentração da polpa de minério, (densidade), porém, seu desempenho, não foi satisfatório para a medição da concentração requerida. Seu entupimento foi eminente, fato que originou sua não recomendação para essa finalidade.

Observação: O fato de citar essas novas tecnologias em testes de homologação na Cia Vale e também Samarco, caracteriza e aponta preocupação desses potenciais clientes, usuários e consumidores desse tipo de tecnologia, ainda experimental no caso da densidade da polpa, em achar alternativas confiáveis, fácil manutenção e instalação e, acima de tudo, que tenha um preço competitivo no mercado para substituir os medidores Radioativos em suas plantas ou unidades operacionais.

3.2.7 Medidor de densidade MD-01LP

Figura 17 - Medidor MD-01LP – Lamon Produtos



Fonte: Elaborado pelo autor

Como já foi inferido em páginas anteriores, o Medidor MD-01LP, Fig.17, funciona baseado em pressões diferenciais totais, portanto, sobre esse ponto de vista, apresenta uma completa independência da temperatura, nível e, dispersão das partículas sólidas dentro do tanque, que contribuem para variação do gradiente da densidade altimétrica. Trata-se de um projeto inovador, com tecnologia pioneira nesse particular, sem similar no mercado de mineração, conferindo-lhe ainda pela facilidade de manutenção e calibração, além de um custo de instalação muito baixo o que vai torná-lo super competitivo no mercado. Assim sendo, vê-se uma grande diferença e vantagem na sua tecnologia em relação ou frente aos demais medidores disponíveis ou em testes de operação dentro da indústria de mineração. Por outro lado, sua instalação não requer intervenção no processo, como parada prolongada, por exemplo, como ocorre com os demais concorrentes. Na manutenção, não exige mão de obra supra qualificada ou especializada, como as necessárias para os medidores radioativos, além de ser raramente necessária.

O lançamento desse novo modelo de equipamento, após sua homologação, acredita-se poderá ajudar a melhorar a real medição da densidade, onde a estabilidade, repetitividade e exatidão são fundamentais, tendo como parâmetro importante no mercado, preço muito competitivo. Além de ter uma eletrônica, micro processada, o MD-01LP tem ainda por vantagem, uma programação, simples, amigável, podendo ser configurado tanto pelo computador, quanto pelo seu teclado de 04 teclas situadas no seu painel frontal. Seu *display* é alfanumérico de duas

linhas com 16 colunas, onde toda informação da programação pode ser vista, alterada, gravada e ou, regravada.

Os sinais de entradas vindas da medição no tanque e o sinal de saída indo para o controlador da densidade (DIC) instalado junto ao tanque, ou mesmo para o PLC que fica no CCO da Usina, são sinais de corrente no padrão, faixa de 4 a 20 mA, podendo ser sinais, tanto ativo como passivo.

A alimentação do MD-01LP é por tensão contínua, faixa de 12 a 30 Vdc. No *display* quando manuseado e, rolado pelas teclas “up and down” apresenta as seguintes funções:

- a) Densidade: 1,00 = Valor de saída: 4,00 mA; 0,7% do span
3,00 = Valor de Saída: 20,00 mA; 0,7% do span
- b) Nível: mCA, Pressão: mCA;
- c) Nível: mA, Pressão: mA;
- d) Nível: 4,00 mA = 0,00mCA; incerteza 0,5% do span
- e) Nível: 20,00 mA = x mCA;
- f) Pressão: 4,00mA = 0,00mCA; incerteza 0,5% do span
- g) Pressão: 20,00mA = y mCA;
- h) Densidade: Varia o limite inferior e superior;
- i) ADS0 = x Contagem digital equivalente ao nível;
ADS1 = y Contagem digital equivalente a pressão;
- j) Cut Off: Variável a partir de zero configurável;
- k) Tecla OK marca a função a ser alterada para um novo valor;
- l) Teclas up and down varia numericamente os valores numérico da função
- m) Tecla menu, grava o novo valor da função que foi alterada;
- n) Tecla Reset retorna a função para seu valor original antes da gravação.

A densidade medida, indicada no ***display*** e transmitida é uma solução algébrica de cálculo entre nível, densidade e peso, cujo resultado é um número puro, equivalente a densidade interna reinante no tanque naquele instante. Daí, podemos afirmar com segurança, que existe, uma total independência da variação do nível do tanque, assim como do gradiente da densidade ou de particulados que, por vezes, é recorrente no interior do tanque.

A razão de 4,00 mA como sinal de saída, equivalente ao zero ou ponto inicial da medição de uma variável, assim como 4,00 mA inicial saindo do controlador, tem por característica fundamental a denominação de “**zero vivo**”. Tanto o PLC quanto um controlador discreto PID tem as funções de controle proporcional, integral e derivativo.

4 METODOLOGIA

A metodologia dessa dissertação teve por base, inicialmente conhecer a real necessidade da empresa, Cia Vale e Samarco, na procura de um substituto que atenda seus anseios em substituir o medidor Radioativo. Nesse sentido, contatos preliminares e primários foram realizados nas supervisões dos setores competentes que avaliam e testam os projetos instrumentais dos interessados.

Em análise preliminar no estudo da utilização do Borbulhador, apresentado como alternativa de medição, montado e instalado em tanque paralelo de pequeno porte, com alimentação da polpa por via “*by pass*”, foi descartada pela Cia Vale, bem como outro novo projeto, representado por um modelo de tanque de amostragem, ainda menor, instalado por cima do Tanque principal de homogeneização, com alimentação tipo “over flow”, constante, derramando a polpa dentro do Tanque principal, caracterizando desta forma, nível sempre constante na amostragem e, a conseqüente medição da densidade via Borbulhador, foi da mesma forma, projeto rejeitado e descartado.

Com as duas proposições analisadas e rejeitadas, guiamo-nos para uma nova solução ou alternativa seguinte, qual seja, medição e calculo via micro controlador onde, além das medições das variáveis necessárias, normais de processo, empregadas no calculo da densidade, agregamos mais funções no algoritmo desenvolvido, possibilitando mais condições de ajuste nos menus de programação e configuração, com o fim de se obter o exato valor da densidade operante em tempo real, dentro do tanque de homogeneização da polpa.

Retornado a metodologia geral com o objetivo de se estudar, começar e terminar um projeto como um todo, o primeiro passo a ser contemplado é ter noção e clareza dos princípios físicos para a medição da densidade que são: medição da altura do nível de cima para baixo e seu próprio nível de baixo para cima, objetivando dessa forma uma base matemática fundamental para o cálculo da densidade via micro controlador. O objetivo final do projeto, sua funcionalidade e os caminhos a ser seguido para atingir o objetivo final, é ter como preceito básico maior, sua aceitação e homologação pela Indústria. Baseado nessa premissa e tendo como objetivo a medição e transmissão “*em linha*” do valor da densidade de uma solução aquosa, o projeto assim teve seu início. Variando-se o nível ou a densidade o micro controlador se encarregará de fazer as contas calculando a densidade. Esse foi o princípio de

nossa formulação de um projeto básico tendo como conceito a metodologia de manter o nível que apesar de variável, ser visto nos cálculos executados pelo micro controlador como uma função constante. A partir desse conceito surgiu a idéia da metodologia básica contida no diagrama de bloco da figura 19 e 20. Obviamente dentro da programação do micro controlador surgiram detalhes de programação que contempla alguns fatores e segredos que são próprios e protegidos dentro da filosofia de um projeto bem-sucedido. Daí, a metodologia física do equipamento está contida no circuito eletrônico apresentado em forma de esquemático, porém, negado esta a metodologia empregada no desenvolvimento do programa do micro controlador, firmware. Justifica-se aqui o não detalhamento da metodologia total e irrestrita por se tratar de um equipamento inovador ainda estando com a solicitação de sua patente pendente.

4.1 Etapas do Trabalho

O trabalho envolve três etapas:

- a) **Definição e interligação dos blocos eletrônicos** - Nessa etapa, se organizou hierarquicamente os blocos eletrônicos necessários na composição de um todo, suficiente para rodar e atingir a real medição da densidade, onde se tem como saída o sinal eletrônico equivalente a medição. A partir desse contexto, especificam-se os componentes eletrônicos de cada bloco, necessários a execução das funções determinadas no projeto. Após a escolha do micro controlador, definem-se os conversores, chaveamentos, memória, resistores, teclas de comunicação homem maquina, interfaces, sinal de saída, etc.
- b) **Programação** - Com a estrutura ou esquema eletrônico desenhado, verificado e pronto, desenha-se a placa de circuito impresso com as respectivas interligações dos componentes que depois de alinhados, montados e soldados, elabora e efetuam-se preliminarmente os testes elétricos de hardware da placa. Instala-se e testa o programa previamente em nível avançado ou por etapas à medida que as rotinas do programa vão ficando prontas e instaladas, testadas e corrigidas se forem necessários.

Depois de vencida essa etapa, o equipamento estará pronto para o teste de desempenho na bancada ou laboratório;

- c) **Montagem do Equipamento no Campo e “Start Up”** - Antes de o equipamento ser instalado no processo de fato, deve-se testá-lo sobre todos os aspectos de operação na bancada, com simulação dos sinais de entrada, impondo variações percentuais das faixas programadas, observando a estabilidade e os valores de saída. Eventualmente deve-se simular a presença de ruídos ambientais no sentido de observar a imunidade da eletrônica do equipamento em operação, pois na mineração ele vai estar sujeito a todo tipo de ruído local. Após essa etapa, é interessante operar com o equipamento numa real simulação em tanque com água e outros produtos de densidade conhecida, testando e certificando a operosidade do equipamento na sua real condição de teste de operação em processo de simulação real. Posterior a essa etapa, o equipamento está pronto para entrar em operação na Indústria de mineração ou de transformação equivalente.

Na mineração o MD-01LP receberá sinal do nível do tanque, medido por qualquer dos medidores de nível já instalado ou a instalar no tanque de polpa. Receberá também sinal da cápsula instalada na base do tanque onde na sua instalação devem ser observadas as condições de seu posicionamento a fim de se evitar deposição do particulado, polpa, em sua membrana ou diafragma sensor, portanto, ela deve ser instalada numa localização a ser bem analisada, tendo sua membrana sensora alinhada ou rente com a parede interna do tanque, evitando assim, deposição entre as margens interna da luva de fixação da cápsula e a sua membrana sensora. Também deve ser observado distanciamento de sua posição em relação ao ponto de saída da polpa pela sucção da bomba.

4.2 Metodologia experimental de Laboratório

Em laboratório ou bancada para o teste de operosidade e desempenho, conforme figura 24, realiza-se inicialmente o teste de simulação com as entradas de sinal eletrônico diretamente equivalente a faixa do nível medido, assim como sinal eletrônico equivalente a altura altimétrica da coluna líquida. Ambas as aplicações dos sinais, devem ser variados simultaneamente e, posteriormente um deles fica fixo

com variação do outro. Ainda, na fase experimental de laboratório, além do teste de simulação com variações de sinais eletrônicos proporcionais de 4,00 a 20,00 mA, montou-se um pequeno tanque onde se instalou sobre sua superfície um medidor de nível ultrassônico e na base do tanque, a cápsula como pode ser visto pela figura 24. Ainda podemos observar, na mesma figura, um computador e dois registradores eletrônicos (*data Logger*) sendo manipulando, programando e configurado segundo as daquele processo local para em seguida colocá-lo em operação.

A configuração da altura do tanque, faixa da densidade, “cut off”, e outras variáveis de configuração, foram realizadas pelas teclas do medidor, assim como poderiam ser realizadas pelo computador. Com o computador, realizou-se a configuração dos dois registradores, (*data loggers*), um registrando o nível e o outro registrando a densidade. A configuração do ultrassônico de nível foi realizada nele próprio e repassada para o MD-01LP. A faixa de operação da cápsula piezo resistiva por ser fixa, teve sua condição de medição altimétrica do tanque compensada via programação no MD-01LP..

Após toda configuração dos parâmetros pertinentes ao pequeno tanque da figura 24 e aos elementos primários de medição nele instalados, partiu-se para a operação de medição dinâmica, inicialmente com água e posteriormente com glicerina e silicato de sódio. Os resultados estão contidos nos gráficos das figuras 36, 37, 38, 39. No laboratório, os resultados experimentais foram animadores, tanto na simulação quanto na medição das densidades fixas e conhecidas. Quanto aos ensaios de variação das mesmas, assim como na variação do nível, se observou a independência total na saída do sinal de densidade com a variação do mesmo. Os valores observados na indicação assim como os registros históricos das variações, foram exatos sem qualquer erro observacional.

4.3 Metodologia experimental no processo Industrial

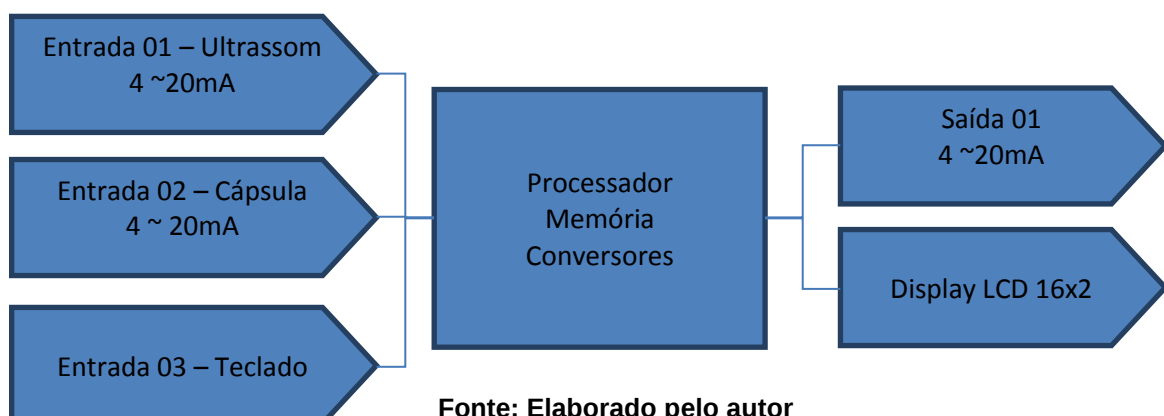
Quanto à metodologia real e resultados do experimento, ou seja, diretamente na produção, só poderemos relatá-la e analisá-la após sua instalação e operação em algum dos tanques operando com polpa de minério real, onde no contexto de seu desempenho serão registrados o nível e a densidade que em tempo real ou histórico, poderá ser comparado com as indicações e registros locais da operação da planta e do tanque em questão ou com medições pontuais de laboratório.

Observa-se aqui agora, nessa oportunidade que depois de muita conversa técnica e insistência, o procedimento de instalação na mineração, para o devido teste de operação dinâmica real do MD-01LP foi conseguido e atingido, com a autorização do Setor de Instrumentação e Controle da Usina de Mineração de fato, que após perceber o grande valor no trabalho e obstinação no projeto, o mesmo poderia suprir e valorizar a necessidade interna do setor, na medição da densidade que até então carece de confiabilidade no equipamento concorrente, até então em operação com homologação ainda parcial. Daí adiante, burocracias internas foram conversadas, discutidas, ultrapassadas e, extra-oficialmente o MD-01LP foi instalado na área industrial da mineração. As figuras, 25 e 26, mostram detalhes do procedimento da instalação do sensor ultrassônico de nível na parte de cima do tanque de equalização ou homogeneização da polpa e na figura 26 a instalação da cápsula de medição na base do mesmo.

4.4 Etapas de execução

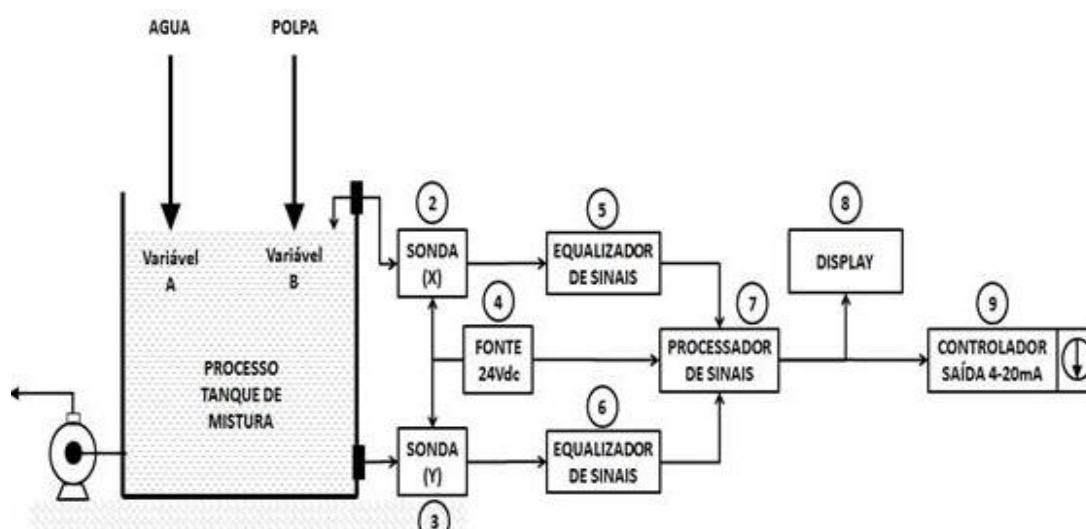
Essa etapa, detalha a partir do resumo técnico o desenvolvimento ilustrativo, figuras 18, 19 e 20 onde, as entradas dos sinais analógicos de 4 a 20 mA, cada qual representando uma dada medição que depois de ser convertido em sinal digital, nível ultrassônico entrando pelo canal 01 e o sinal da cápsula, também convertido em sinal digital, entrando pelo canal 02, segue canal 03 representativo do teclado, elo de comunicação como o micro controlador. Após o processamento dos sinais internamente pelo micro processador dentro de uma programação pré-determinado, e elaborado numa linguagem própria, libera informação digital que depois de convertido em analógico é reforçado para 4 a 20 mA saindo pelo canal 01, proporcional a densidade medida, também mostrado pelo display.

Figura 18 - Resumo técnico



Seguindo como parte do resumo técnico, vem a apresentação do diagrama esquemático do projeto em forma de blocos, Fig.19, criado a partir do sistema integrado de medição no tanque de homogeneização. A partir dos blocos se desenvolveu a composição eletrônica total apresentada na figura 21A e 21B. Na figura 21 e B vê-se com detalhes a interligação total dos componentes eletrônicos como resistores, capacitores, transistores, circuitos integrados, conversores analógicos digitais, micro processador, etc., montados e alinhados.

Figura 19 - Diagrama em Blocos Eletrônicos da interligação do MD-01LP



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura acima, Fig.19, ilustra-se cada um dos blocos componentes de um todo no sistema de medição da densidade a partir do tanque de mistura da polpa com água normalizando ou homogeneizando a mistura.

- 1) Processo tanque de mistura. Nesse tanque, tanto a água quanto a polpa caem com pressão, causando grande turbulência como forma de agitação natural do processo;
- 2) Sonda X. Esta sonda medirá continuamente, em tempo real, o nível da polpa no tanque. Vários tipos de sonda poderão ser utilizados, nesse processo, como por exemplo, ultrassônico, radar, ondas guiadas, vareta capacitiva, e o tradicional borbulhador. A condição de saída da sonda X é um sinal proporcional de 4 a 20 mA equivalente a 0 a 100% do nível do tanque;
- 3) Sonda Y. Esta sonda medirá a coluna da polpa. Seu princípio de funcionamento, normalmente é o piezo resistivo. Nesse tipo de sonda é muito importante seu tipo de construção física, sua localização e instalação no processo onde se evitará ao

máximo a possibilidade de incrustação e ou deposição de polpa na região próxima de sua instalação, ou mesmo em seu diafragma sensor. Da mesma forma, o sinal de saída da sonda Y é um sinal de 4 a 20 mA, equivalente a coluna de polpa de 0 a 100%;

4) Fonte de alimentação 24 Vdc. O Equipamento MD-01LP, com seus componentes eletrônicos digitais, funciona internamente com tensão “DC” de 3,6 volts. Todavia, por questões universais de poder ser utilizado na versão Ativo/Passivo, deverá ser alimentado perifericamente com tensão que poderá variar de 12 a 36 Vdc. Normalmente a tensão DC fica no valor de 24 volts. A fonte de alimentação interna ou externa recebe 110/220 volts de tensão alternada, transformando-a para tensão de 24 Vdc;

5) e 6) Equalizador de Sinais. Esses dois blocos eletrônicos, recebem sinais de 4 a 20 mA, compatibiliza, e os transforma em sinais digitais enviando-os para o microprocessador;

7) Processador de Sinais. O Processador ou micro controlador é o mais importante elemento eletrônico do MD-01LP. Ele é responsável por escalonar os sinais de entrada, efetuar filtros digitais e realizar os cálculos necessários para se obter o valor da densidade. Além disso, em função de parâmetros interno, é responsável também por gerar o sinal de saída proporcional ao valor da densidade;

8) *Display*. No *display*, elo de comunicação homem/máquina, se parametriza em valores, todas as informações necessárias equivalentes ao processo a ser medido. É através dele, que o usuário pode verificar em tempo real, o valor das variáveis de processo;

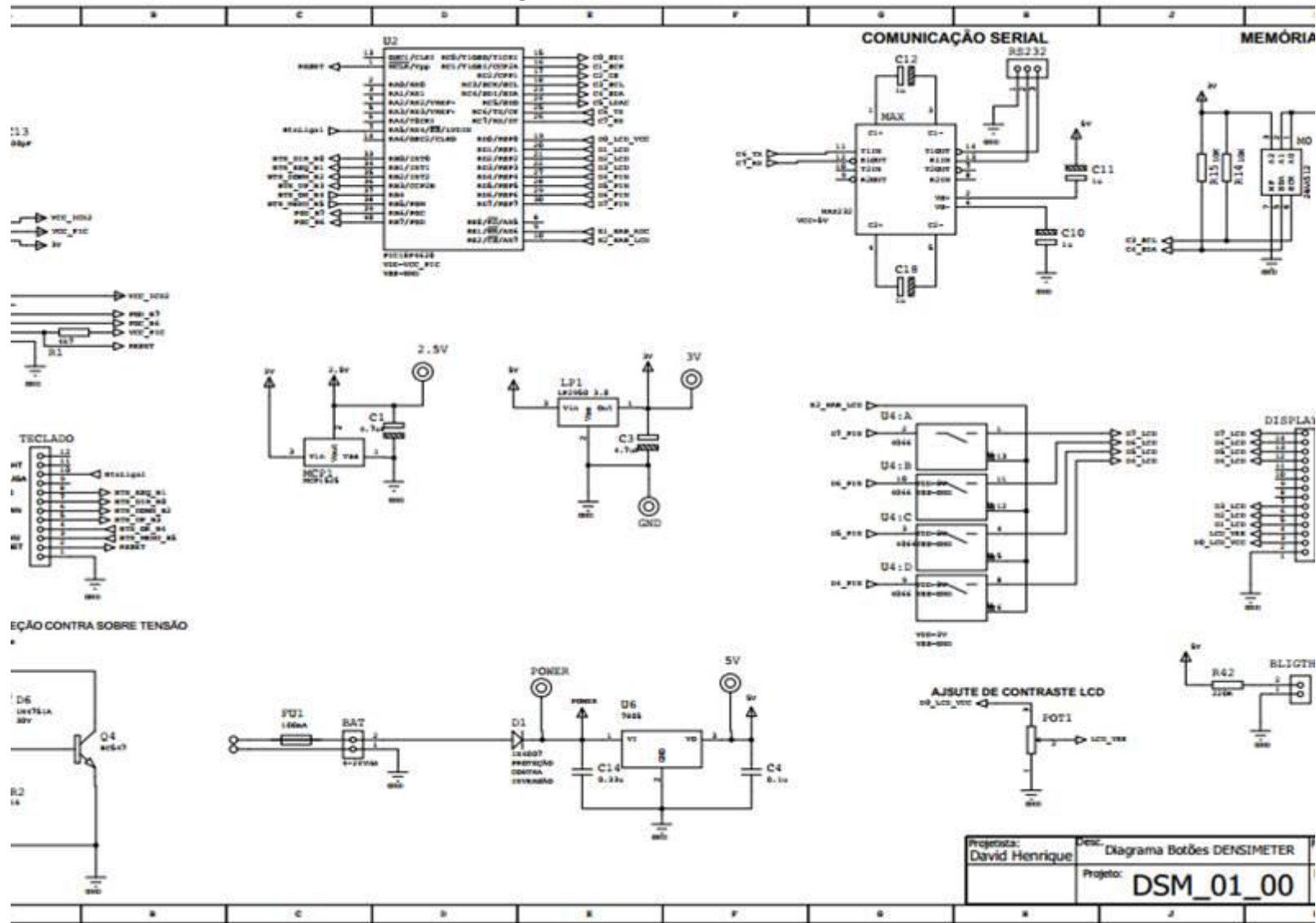
9) Controlador ou buffer, depois dos sinais serem processados pelo micro controlador, volta a ser transformado em analógico pelo circuito controlador ou conversor e, em sequência pelo circuito de potência, transforma-o em sinal universal de corrente constante de saída, 4,00 a 20,00 mA, equivalente ao valor da densidade processada ou medida dentro do tanque. Quando dizemos corrente constante, significa que para um valor de densidade medida e seu valor equivalente em corrente de saída, a impedância do circuito receptor, por onde essa corrente vai circular, pode variar, por exemplo, de 0 a 750 ohms sem, contudo, variar seu valor de saída.

Figura 20–Especificação modal

ITEM	NOME	TIPO DE SINAL	CARACTERÍSTICAS/FUNÇÃO
01	Entrada 01 – Ultrassom	Entrada analógica 4 ~ 20mA	Leitura das variáveis de pressão e nível par ao cálculo da densidade, tendo: ✓ Conversor de 22bits. ✓ Resolução 0,01mA (estimado) ✓ Leitura sobre resistor de precisão 100R ✓ Proteção contra inversão de polaridade e sobre tensão.
02	Entrada 02 – Capsula	Entrada analógica 4 ~ 20mA	
03	Entrada 03 – Teclado	Teclado de setas (<u>Up,down,Ok,Menu</u>)	Utilizado para navegar entre os menus e configurar o equipamento. <i>Será utilizado a mesma máscara do DPP-Logger</i>
04	Saída 01	Saída analógica 4 ~ 20mA	Saída em função da densidade calculada, tendo: ✓ Conversor DA 12bits. ✓ Resolução 0,05mA (estimado) ✓ Circuito com alimentação externa ✓ Controle de corrente por transistor.
05	Display LCD 16x2	**Protocolo do fabricante**	Exibirá tanto as variáveis medidas quanto a variável calculada, além dos Menus de configuração do equipamento.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21A circuito eletrônico - detalhamento



Fonte: Elaborado pelo autor

O esquema apresentado na figura 21A e 21B são especificamente a interligação eletroeletrônica dos componentes envolvidos na configuração “**hardware**” e a figura 22 apresenta a disposição ou locação física dos componentes na placa de circuito impresso, cuja listagem dos componentes está evidenciada na figura 23.

Figura 22–Placa de circuito impresso



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 é a placa de circuito impresso, dupla face, com seus respectivos componentes dispostos, na face inferior e na parte superior, além do display removível, instalado em cima do microcontrolador onde fica sua base de fixação.

Figura 23 – Lista de Material DENSI. Rev01

1 Modules			
Quantity:	References	Value	Order Code
1	M0	24AA512	
11 Resistors			
Quantity:	References	Value	Order Code
1	R1	4k7	M180K
2	R2, R4	1k	M47K
1	R3	100R	M47K
2	R14, R15	10K	M180K
2	R20, R22	100R	M180K
2	R21, R23	220R	M180K
1	R42	220R	
9 Capacitors			
Quantity:	References	Value	Order Code
2	C1, C3	4.7uF	AU09K
1	C4	0.1u	WX50E
4	C10-C12, C18	1u	AU09K
1	C13	100pF	WX56L
1	C14	0.33u	WX50E
6 Integrated Circuits			
Quantity:	References	Value	Order Code
1	U1	OPA244UA	
1	U2	PIC18F4620	
2	U4, U5	4068	
1	U6	7805	
1	U7	MCP4921	
2 Transistors			
Quantity:	References	Value	Order Code
1	Q3	TIP31	
1	Q4	BC547	
7 Diodes			
Quantity:	References	Value	Order Code
4	D1, D2, D7, D8	1N4007	
2	D3, D4	1N5985B	
1	D6	1N4751A	
20 Miscellaneous			
Quantity:	References	Value	Order Code
3	AD0, GRAV, RS232		
2	ADS0, ADS1	MCP3551	
2	BAT, IOUT	CONN-SIL2	
1	BLIGHT	CONN-H2	
1	DISPLAY	CONN-SIL14	
1	FU1	100mA	
2	GND, POWER	PIN	
1	J1	CONN-SIL3	
1	LP1	LP2950 3.0	
1	MAX	MAX232	
1	MCP1	MCP1525	

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 23 detalha a lista de material dos componentes utilizados na placa de circuito impresso com suas respectivas referências, valores e código, possibilitando a compra dos mesmos.

4.5 Estrutura de montagem para teste de operação

Nessa etapa será detalhada a instalação e montagem do equipamento MD-01LP no Laboratório e na área industrial. As ligações físicas terão entradas dos transmissores instalados no tanque de homogeneização e a saída do sinal da medição direcionada para registrador e ou controlador DIC instalado na área industrial ou remotamente na sala de controle CCO da Empresa onde reside PLC.

4.5.1 Montagem em Laboratório

Figura 24 - Dispositivo tanque de simulação e teste de Bancada



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse dispositivo simulando um pequeno tanque real, Fig.24, instalou-se o medidor de nível ultrassônico, no topo do tanque e, a cápsula piezo resistiva, de pressão, instalada um pouco acima de sua base. No tanque, foram realizadas as experiências com variações do nível e densidade. Com o dispositivo tanque e, os

elementos primários de medição, acoplado eletronicamente ao MD-01LP, o cálculo da densidade, digitalmente processado, tornou-se aparentemente a equação.

$$\rho = \frac{mCA.Kc.Kec.Fr1}{mCA.Ku.Fr2} \quad 05$$

Difícil é conseguir um bom posicionamento dos elementos sensores, como por exemplo, o medidor da coluna, sua conversão em mca, e o nível da mesma coluna, medida pelo ultrassom, referenciada com exatidão ao mesmo ponto próximo onde se instalou a cápsula de pressão. Na prática de laboratório o processo de instalação e referencial é simples e fácil. Na mineração, em tanque real, já em operação, a instalação, sintonia, referencial e calibração, podem ser mais trabalhosas necessitando às vezes, de compensações agregadas ou corrigidas pelo programa executável do MD-01LP.

A figura 24, foto do experimento em laboratório, dá-nos detalhes das ligações para a respectiva operação dinâmica das medições de entrada, cálculos via MD-01LP e transmissão de sinal de saída equivalente a densidade calculada. O “**modus operandi**” nesse particular é ativo/ativo. Ou seja, terra comum internamente

- a) Tubo de PVC de 150 mm de diâmetro, 0,60 m de altura (Tanque);
- b) Medição do nível pelo medidor ultrassônico, instalado sobre o tanque;
- c) Cápsula de pressão piezo resistiva com Span fixo de 2,50 mCA;
- d) Dreno de saída do tanque com válvula de bloqueio;
- e) MD-01LP eletronicamente interligado com o tanque e respectivos registradores eletrônicos de dados, (*data logger*);
- f) Densidade ρ , equivalente ao sinal transmitido.

Observação: Ao rolar os menus vistos no *display*, adicionou-se na programação, novo fator que vai permitir correções entre a densidade medida e a densidade real verificada em laboratório. Esse novo fator tanto pode ser maior ou menor que 1.000 com variações de milésimos. A discrepância pode ser observada na prática a qual existindo, ou advir devido a desvios de nivelamento referencial entre a cápsula de pressão instalada e o nível fornecido pelo ultrassom, principalmente quando a medição do mesmo provier do medidor de nível já instalado pela companhia. Ainda, sendo oportuno para corrigir se necessário, problemas de

desvios na medição, devido a pequenos arrastos causados pela sucção da bomba, por estar, às vezes, muito próxima da célula de pressão, o que deve ser evitado.

4.5.2 Instalação do ultrassom no tanque homogeneização

Figura 25 - Tanque de Homogeneização-Vale



Fonte: Elaborado pelo autor

Instalação do medidor ultrassônico sobre o tanque de homogeneização, e da cápsula de pressão, Cia Vale – MG. A partir da instalação, segue sua interligação eletrônica com o MD-01LP. Nas primeiras semanas de funcionamento, diretamente no processo, sua operação foi na modalidade ATIVA, isto é, a alimentação de 24 VDC para o medidor de nível ultrassônico assim como, a alimentação da célula de

pressão, ambas retornando 4 a 20 mA, que são sinais proporcional de corrente, entram no MD-01LP pelos canais 1 e 2 respectivamente.

Na figura 25, em plano superior, processo de instalação do medidor de nível Ultrassônico sobre o tanque, numa cantoneira em “L” com luva na extremidade para fixação do medidor. Ainda na figura 26, em primeiro plano frontal, o medidor de densidade da marca “Smar” instalado em um pequeno reservatório tipo vaso comunicante, denominado carrapato, nivelado com a tomada de sucção da bomba. Ao lado direito, no mesmo nível, se instalou a cápsula de pressão. O resultado da medição e o registro da densidade da polpa, após a instalação e calibração do medidor ultrassônico, bem como da cápsula de pressão assim como do MD-01LP, estão impresso e exposto no gráfico da figura 40 e 41, registrados por “data logger” local.

4.5.3 Instalação da cápsula de pressão

Figura 26 - Tanque de Homogeneização-Vale



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.4 Instrumentos utilizados no Laboratório e na área industrial

Varias são as opções de tipos ou modelos de instrumentos que se aplicam na instalação como elemento primário de medição de nível de cima para baixo (ultrassom) e de baixo para cima (cápsula), no tanque de homogeneização. Os seguintes instrumentos podem ser aplicadas ou avaliadas.

Figura 27 – Medidor ultrassônico de Nível– SOLID



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 27, apresenta-se o medidor ultrassônico de nível. São muitos os fabricantes desse tipo de medidor pelo mundo afora. Aqui no Brasil contabiliza-se de 6 a 8 fabricantes nacionais. O medidor apresentado na figura 36 é de procedência de Israel, trazendo consigo grande flexibilidade na medição do nível e outras funções matemáticas correlacionadas. Sua faixa de medição programável pode se estender de 0,3 a 18 metros. Seu sensor e a eletrônica embutida possui filtragem que praticamente elimina falsos ruídos ou ecos instáveis devido a presença de espuma que às vezes é recorrente ou se forma na superfície altimétrica da solução aquosa ou polpa. A operosidade de um medidor ultrassônico de nível baseia-se na emissão de pulsos portadores de frequência que são refletidos pela superfície que está sendo monitorada. O sensor emissor utiliza cristais piezométricos de alto desempenho que quando excitado gera curtos impulsos de ultrassom na forma de ondas sonoras. O tempo de trânsito entre a emissão do pulso e seu retorno é medido pelo dispositivo eletrônico do equipamento. O sinal de saída equivalente ao

nível medido, tanto pode ser analógico quanto digital. Sendo digital, a flexibilidade de transferência desse sinal para outros protocolos é bem mais flexível e simples e a baixo custo, não exigindo conversor.

Figura 28 – Cápsula de Pressão – JUMO



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 28, cápsula de medição de pressão ou nível, é um medidor transmissor de sinal analógico, medindo a altura dinâmica do nível do tanque. Essa cápsula em especial é importada, todavia existem dezenas de modelos aplicáveis. Seu princípio de funcionamento é o piezo resistivo onde um diafragma existente na ponta da cápsula, encapsulamento tipo “flash”, em contato direto com o fluido, sofre deformação elástica, sensibilizando um pequeno sensor, piezo resistivo, localizado na parte interna ou posterior a membrana. Com a sensibilização do minúsculo sensor pela membrana, variam-se proporcionalmente as resistências elétricas em forma de ponte acopladas a um circuito eletrônico que transforma e transmite tal deformação em sinal eletrônico proporcional ao nível medido. A instalação da cápsula é simples, sendo a mesma rosqueada em uma luva de 3/4 de polegada, soldada externamente na parte baixa ou base do tanque em operação.

Figura 29 - Cápsula pressão por imersão – GE



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 29, tem-se o mesmo tipo de cápsula, piezo resistivo que opera transformando deformação física como a cápsula da figura 28, em sinal eletrônico proporcional. Sua diferença é geométrica. Seu contato com o processo é total, sendo introduzida verticalmente de cima para baixo até próxima ao fundo do tanque por meio de cabos especiais onde o isolamento e a resistência mecânica do cabo e da própria cápsula têm que ser bem blindado. Esse tipo de transmissor pode ser uma opção para a medição do nível da polpa onde a instalação seria rápida e de baixo custo operacional. Normalmente esse modelo, apesar de poder ser aplicado no projeto, é mais indicado para nível de poços de grande profundidade como nos poços artesianos ou mesmo reservatórios ou barragem de qualquer natureza.

Figura 30 - Borbulhador tradicional



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 30 tem-se um esquemático do tradicional borbulhador. Sua função é a medição de nível em tanques de qualquer dimensão. Com pequena adaptação mede-se com altíssima exatidão a densidade do meio aquoso. Quando o borbulhador for utilizado para a medição da densidade, torna-se necessário que o nível do reservatório onde o borbulhador for instalado ou acoplado, permaneça sempre constante, o que é conseguido através do derramamento da polpa pela sua superfície superior ou por meio de um ladrão convenientemente instalado. Normalmente se instala um pequeno tanque derramando a polpa dentro do tanque principal. Quanto mais exato for o indicador ou registrador eletrônico da densidade transmitida pelo borbulhador, mais exata é a medição. Portanto, o borbulhador é um equipamento de medição de nível ou densidade quase que perfeito. Numa instalação de medição, o borbulhador estará medindo o peso da coluna líquida deslocada ou expulsa pela pequena quantidade de ar que entra na sonda, ou tubo fixado dentro do tanque, tendo como indicação a altura ou peso dessa coluna. A pequena vazão de ar que é direcionada para o tubo ou sonda deve ficar numa razão de 4 a 8 bolhas por segundo, produzindo uma corrente de ar contínua na forma de um escoamento permanente, expulsando da sonda o fluido que nela entra pela propriedade de vaso comunicante.

4.5.5 Exatidão do MD-01LP

O medidor transmissor de densidade MD-01LP, processa sinais digitais em um micro processador de 08 Bits. O conversor analógico/digital, alimentado com 2,5 Vdc como referência padrão, converte sinais analógicos originados dos sensores instalados no tanque, transformando-os para digital na razão de 22 bits, o que confere uma resolução de sinal digital da ordem de 0,000596mV/bit. Tal resolução evidenciada nessa conversão de 22 bits é muito alta. Todavia, após aplicar filtro digital, atenuadores de sinal, ajustes de faixa, etc., na entrada do microprocessador, atenua-se o sinal em aproximadamente uma a duas casas decimais. Como a exatidão do conjunto está mais atrelada à exatidão dos elementos sensores, primários, instalados externamente, conhecidos como transmissores, os quais, normalmente estão na faixa de 0,5% do “*span*” da medição, pode-se dizer e definir que o valor da densidade calculada, indicada e transmitida pelo MD-01LP, está na casa de 0,7% do “*span*”, ou da faixa de medição. Segundo Kline e McClintok (1953), a incerteza de um resultado é influenciada pelas incertezas das variáveis independentes que compõe esse resultado. Assim sendo, tem-se:

I_p = Incerteza do medidor de pressão (cápsula) = 0,5% definido p/fabricante

I_n = Incerteza medidor ultrassônico = 0,5% definido pelo fabricante

$I_{A/D}$ = Incerteza conjunto eletrônico A/D = 0,06% definido pelo projeto, ou seja,

$$I_{ctot} = \sqrt{I_p^2 + I_n^2 + I_{A/D}^2} \quad (06)$$

$$I_{ctot} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2 + 0,06^2}$$

$$I_{ctot} = \sqrt{0,25 + 0,25 + 0,0036} = 0,7\%$$

$$I_{ctot} = \text{Incerteza total do conjunto de medição} = 0,7\% \quad (07)$$

Obs; Incerteza e erro de um instrumento. Erro é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro de uma grandeza.

Incerteza e a quantificação da duvida sobre o resultado da medição. É muito difícil avaliar e definir uma incerteza de um equipamento, pois ela depende de uma incerteza tipo A e da incerteza tipo B. Quando um fabricante define a classe de seu

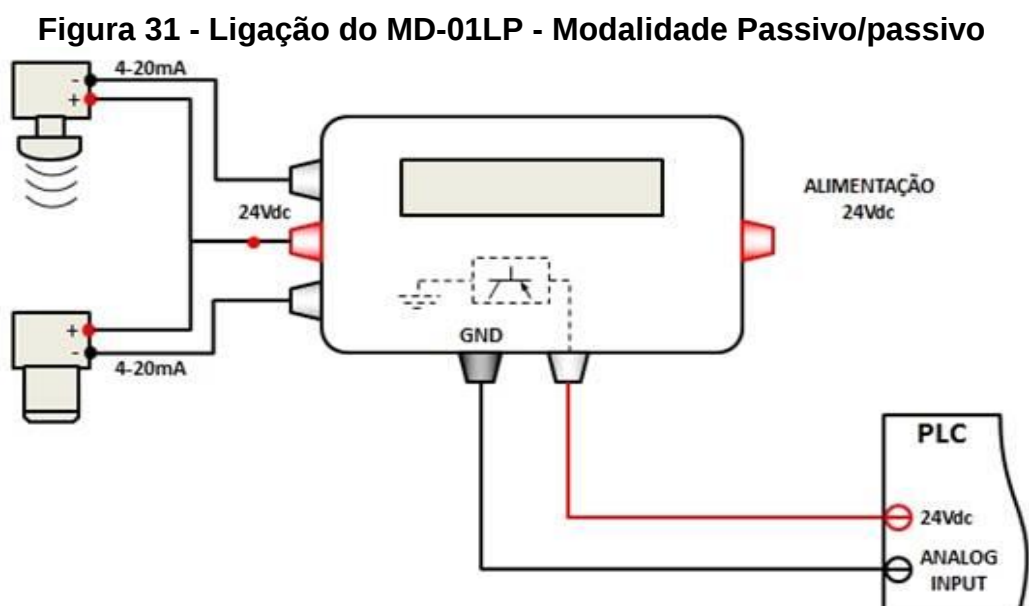
instrumento, pode-se entender que por comodidade se comparou a medida de seu instrumento frente a um padrão superior. Essa é a incerteza do tipo B. Pode-se ainda, depois de ser levantado varias medidas de determinado pontos faixa de medição, calcular o desvio padrão das medições. Uma grande diferença entre erro, repitibilidade e incerteza é que erro e repitibilidade se corrigem enquanto que incerteza não. Portanto, o que esta definido na equação 07 é a incerteza do conjunto.

4.5.6 Modalidade de ligação do MD-01LP

Varias são as possibilidades topológicas de ligação internado MD-01LP. Tudo vai depender de onde ele será instalado e como vai atuar no processo industrial. As opções podem ser;

- a) Passivo/Passivo
- b) Ativo/Ativo
- c) Ativo/passivo
- d) Passivo/Ativo

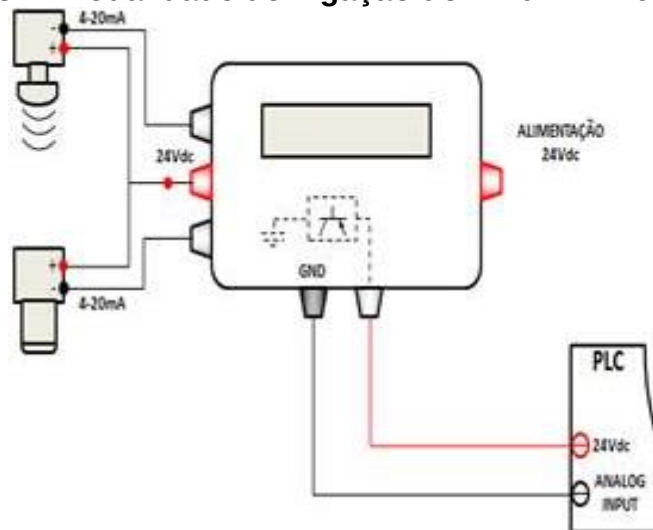
Normalmente na Empresa de mineração já em operação, o mais comum é fazer a ligação **passiva/Ativo**, ou seja, medição de nível já existente no tanque alimentado pela Empresa e a cápsula piezo resistiva ser instalada alimentada pelo MD-01LP. Para situações como essa, internamente a topologia eletrônica deve ser alterada separando os aterramentos de entrada nos conversores A/D.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na hipótese de alimentação passivo/passivo Fig.31 os dois transmissores recebem alimentação vinda do PLC da empresa ou de outra fonte de alimentação auxiliar instalada no CCO. Nesse caso não se tem necessidade de se modificar a topologia eletrônica de entrada. De qualquer forma, essa opção deve ser bem analisada com critérios de análise eletrônica do circuito.

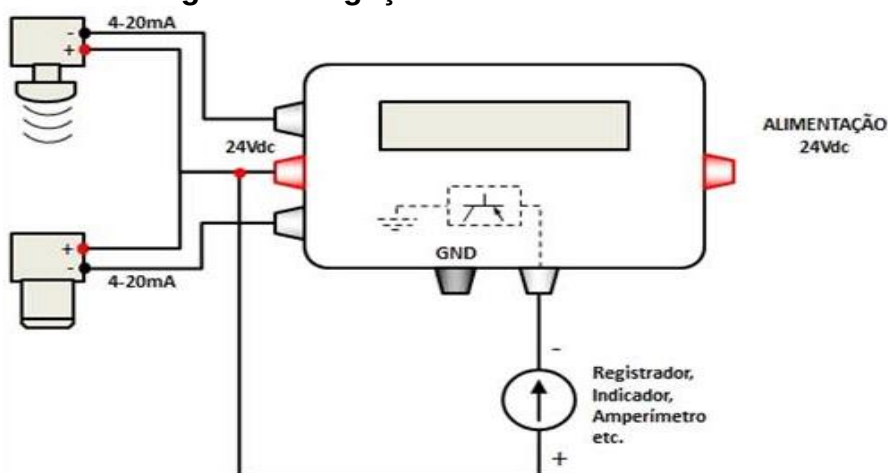
Figura 32 - Modalidade de Ligação do MD01LP. Ativo/ativo



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 32 mostra a modalidade ativo/ativo, qual seja, ultrassom e cápsula sendo alimentada pelo MD-01LP com 24 Vdc e a respectiva saída de sinal de corrente sendo enviado para o PLC do CCO da Empresa.

Figura 33- Ligação do MD-01LP – Modalidade Ativo/passivo

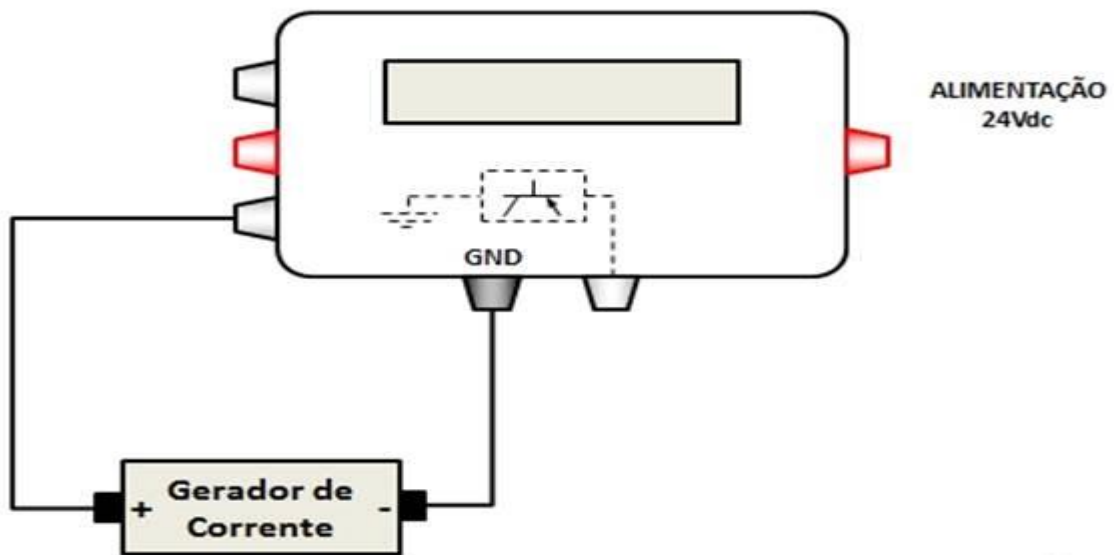


Fonte: Elaborado pelo autor

Na modalidade ativo/passivo Fig.33, a cápsula é alimentada pelo MD-01LP, o ultrassom é alimentado pelo CCO da empresa ou de uma fonte auxiliar

independente. Nesse caso as ligações físicas interna devem ter sua topologia de ligação eletrônica modificada em termos de sinais de entrada nos conversores. . Quando a ligação é ativa, o aterramento interno de entrada é comum. Quando a ligação de entrada for ativo/passivo, o aterramento deve ser separado eletronicamente. Da mesma forma, podendo ser separado ou não quando passivo/passivo. As estratégias de mudança no aterramento são alteradas internamente através da comutação via conector tipo “strap”.

Figura 34 - Ligação simples Leitor de Corrente - Modalidade ligação passiva



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa é uma opção muito particular Fig.34 onde se tem a opção de utilizar o MD-01LP como um medidor de corrente continua na faixa de 0 a 20 mA ou valores múltiplos desde que se escale o resistor do circuito de entrada.

4.5.7 Linhas de Programação – firmware

Na figura 35, abaixo, linhas de programação destacam-se algumas das dezenas de linhas de programação do MD-01LP, tendo como microprocessador central o PIC18F4620. A programação foi realizada em linguagem “C” devido familiaridade geral com esse microprocessador ainda em uso na empresa.

O compilador utilizado é o PCWH da CCS INC; possui diversas facilidades de rotinas prontas, utilizadas para controle dos periféricos tais como, *Display* LCD, Memória i2C, conversor A/D e D/A, etc. Algumas poucas e novas ferramentas e rotinas foram geradas para atender a exclusividade da programação do projeto.

Figura 35 - Linhas de Programação do MD-01LP– Firmware

```

//CNO = ULTRASSÔNICO
//LimInf = 0.00;
//LimSup = 0.54;//m
LimInf = LimCn[0];
LimSup = LimCn[1];//m

ZeroFab = 4.00;
SpamFab = 20.00;

RATE = (LimSup - LimInf) / (SpamFab - ZeroFab); //600/600=1
OFFSET = (LimInf - (ZeroFab * RATE)); //0-0*1=0
U = (CN0mA * RATE) + OFFSET;

//CNI = PRESSÃO
//LimInf = 0.00;
//LimSup = 2.54936;//m
LimInf = LimCn[2];
LimSup = LimCn[3];//m

ZeroFab = 4.00;
SpamFab = 20.00;

RATE = (LimSup - LimInf) / (SpamFab - ZeroFab); //600/600=1
OFFSET = (LimInf - (ZeroFab * RATE)); //0-0*1=0
C = (CN1mA * RATE) + OFFSET;

```

Fonte: Elaborado pelo autor

5 ANALISE DE RESULTADOS

Na fase dos resultados, pretende-se superar três etapas qual sejam:

- a) **Teste em Laboratório:** Variados testes foram impostos ao conjunto montado em tanque de medição com variação e simulação de nível, pressão, parametrização, cálculo e saída de sinal. Os resultados foram muito satisfatórios onde a exatidão esperada foi alcançada;
- b) **Teste no processo industrial;** Aguarda-se a expectativa da instalação do MD-01LP, na mineração propriamente. A oportunidade da instalação afinal conseguida com o fim de se poder avaliar o desempenho do medidor na área industrial. Na fase de teste do MD-01LP, no processo real, caso ele seja bem-sucedido, meta que certamente pode ser alcançada, não há dúvida que o MD-01LP substituirá progressivamente os medidores radioativos, que tem como única desvantagem, ser emissores de partículas radioativas;
- c) **Homologação;** A homologação será o grande prêmio do projeto. Somente será conseguido ou certificado oficialmente após sua instalação documentada e assinada pela empresa acolhedora do projeto, fase essa muito burocrática. Após a análise dos resultados das medições conduzidas por um período ainda não determinado, arbitrado pela empresa que acolher o projeto e o teste, o equipamento será ou não homologado. Nos testes, possivelmente serão analisados dados como, custo de instalação, flutuação, repetibilidade, exatidão, ajustes, facilidade de programação, manutenção e calibração.

Na técnica para avaliação ou análise dos resultados, reporta-se duas condições, estática e dinâmica. A dinâmica é a principal ou final que vai validar a operosidade e desempenho do equipamento na indústria de mineração ou similar, sendo conclusiva para sua homologação dentro da empresa usuária.

Os resultados de laboratório foram muito animadores e exatos no contexto da medição e indicação local com sinal de saída para registro. A operação de indicação e registro da densidade baseou-se na utilização de fluidos conhecidos, puro e saturado com densidade rigorosamente conhecida. Água, densidade 1.00, glicerina, densidade 1.24 e silicato de sódio, densidade 1.55. Os gráficos das figuras 18, 19,

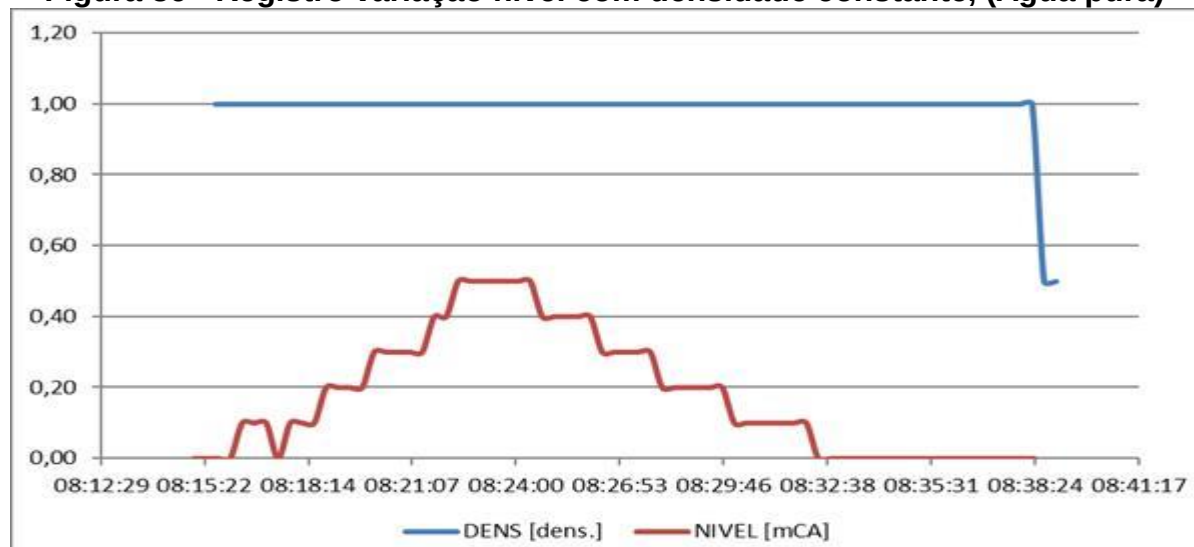
20, e 21 mostram os resultados exatos dos testes laboratoriais do equipamento em sua condição dinâmica na variação de nível com densidade constante. Valores diversos de densidades dentro da faixa de 1.00 a 1.55 foram conseguidas com diluição do produto base com água e a partir da diluição conhecida, a indicação e o registro dos resultados não demonstraram dúvidas, portanto, resultados indicados e registrados, sem erro observacional.

Na mineração, o equipamento MD-01LP ficará instalado, logando e registrando as medições de nível e densidade por um período em teste de no mínimo de 07 dias ou mais segundo a conveniência do usuário. Após sua retirada do processo seus registros serão confrontados com os resultados do padrão da mineradora que, tanto poderá ser o registro da densidade medida pelo Radioativo, em tempo real, instalado no mesmo processo ou pela análise probatória e periódica do laboratório de medição de densidade local. Comparado os resultados, se definirá o erro pertinente das medições levantadas, radioativo versus MD-01LP, com o registro do primeiro sobre a curva de registro do segundo. Também, pode ser analisando e comparado possíveis desvios ou variações pontuais com as medições periódicas do laboratório. A partir dessas verificações ou confronto, poderá se atribuir um possível desvio ou erro da medição. As figuras 36, 37, 38, 39, identificam os resultados do teste no ambiente de laboratório. Figura 40, 41, 42, 43, identifica resultados e testes no ambiente industrial em tanque de homogeneização com os transmissores de nível ultrassom, montado medindo o nível de cima para baixo, e a cápsula medindo de baixo para cima.

Figura 44 apresenta resultado do teste com registro, desta feita, integrado no sistema de registro de dados no sistema operacional, (PLC-CCO Vale).

A homologação ou não do equipamento MD-01LP, etapa final, complexa, morosa e de grande burocracia dentro de uma grande empresa, será o documento final da razão de ser do MD-01LP. Testes preliminares já foram realizados no ambiente industrial, porem, extra-oficial. Com a nova oportunidade que se avizinha, do teste oficial, a certeza do êxito nos novos testes é de total confiança.

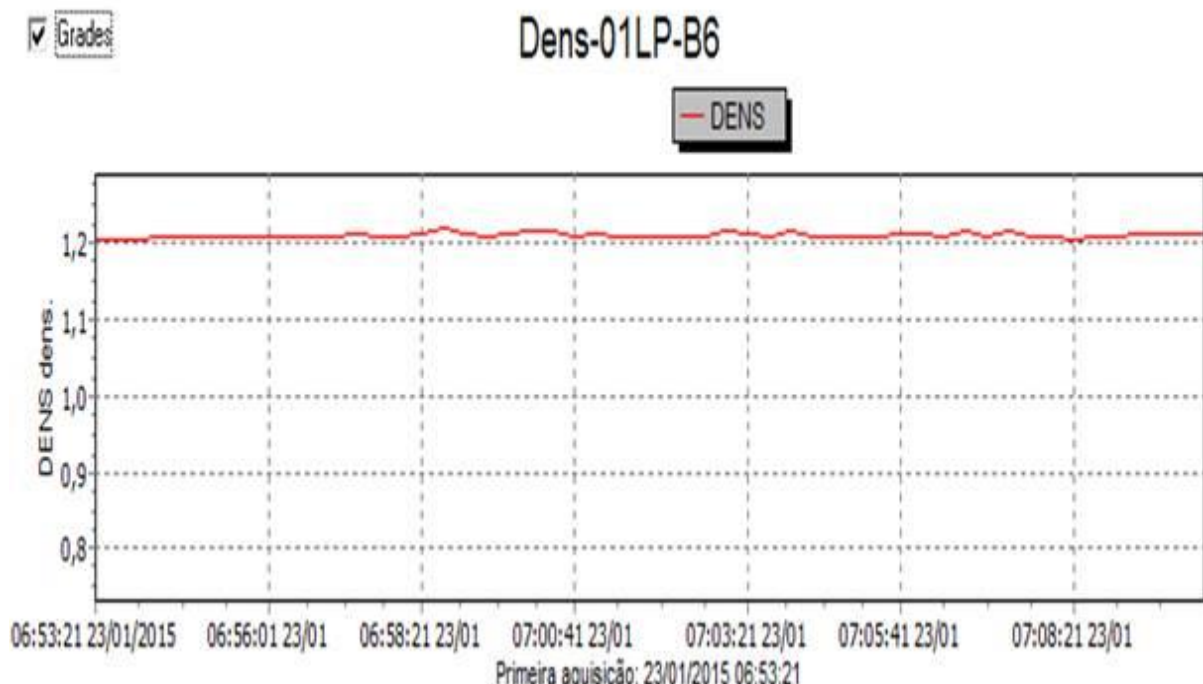
Figura 36 - Registro variação nível com densidade constante, (Água pura)



Fonte: Elaborado pelo autor

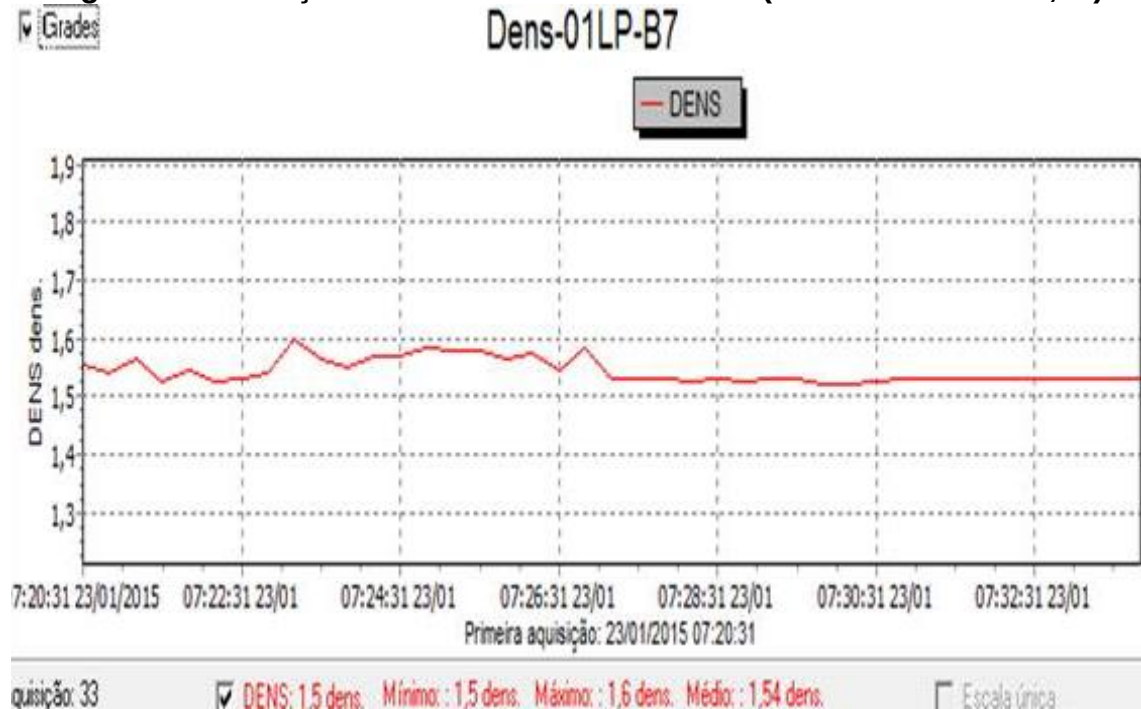
Nesse teste preliminar, Fig.36, a densidade uma vez estabelecida pelo mínimo de nível no tanque, variou-se o nível do tanque em degraus, tanto na subida quanto na descida e a densidade permaneceu constante. Esse ensaio ou teste mostra e prova que o MD-01LP não depende da variação do nível para que se tenha uma medição exata da densidade.

Figura 37 - Medição com registro densidade constante (Glicerina d=1,24)



Fonte: Elaborado pelo Autor

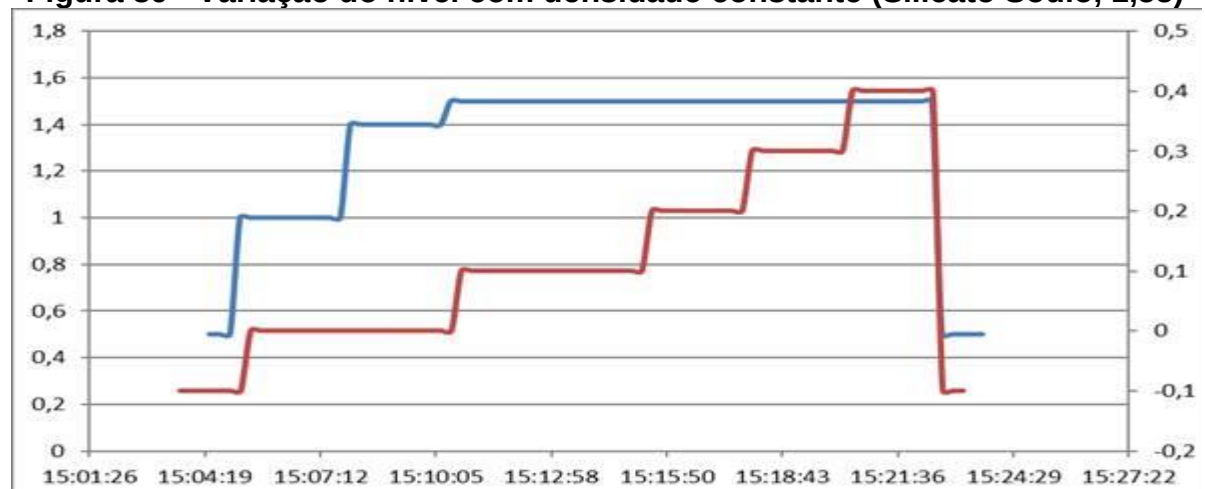
Figura 38 - Medição com densidade constante (Silicato Sódio d=1,55)



Fonte: Elaborado pelo autor

Pequenas variações ou picos de oscilações no registro Fig.38, aconteceram devido à queda brusca por despejo intermitente e brusco do silicato de sódio ($d=1,55$) diretamente no pequeno tanque em medição, onde o nível sofria variações percentuais, o que não aconteceu na descida do nível purgado através de válvula de pequeno escoamento de 100% a 0%.

Figura 39 - Variação do nível com densidade constante (Silicato Sódio, 1,55)

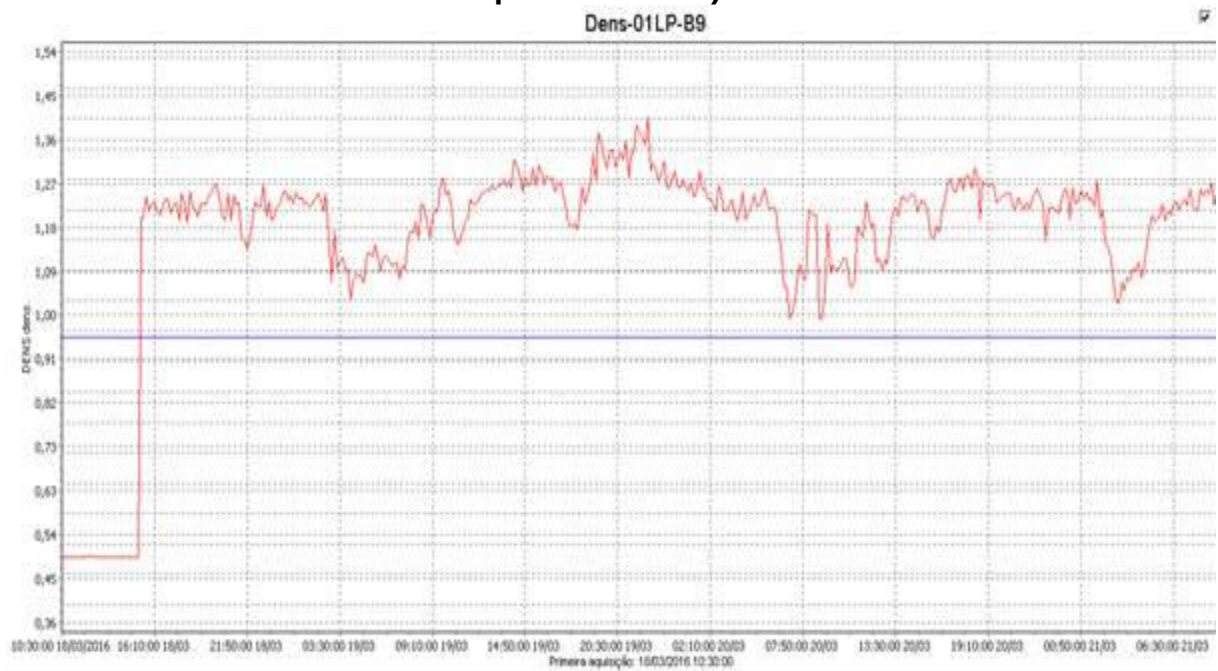


Fonte: Elaborado pelo autor

Na cor vermelha figura 39 tem-se a variação do nível variando em degrau a partir do zero até mais ou menos 0,4 mca. Na cor azul, a densidade que a partir do segundo

degrau se estabilizou, na densidade do processo em medição. Nos instantes iniciais, a densidade não reagiu, pois, a programação do MD-01LP contemplava a opção positiva de zero “*cut off*”, muito oportuno nesse caso, pois tal tipo de estratégia evita uma indeterminação no cálculo da densidade quando o nível se aproxima do ponto de zero nível.

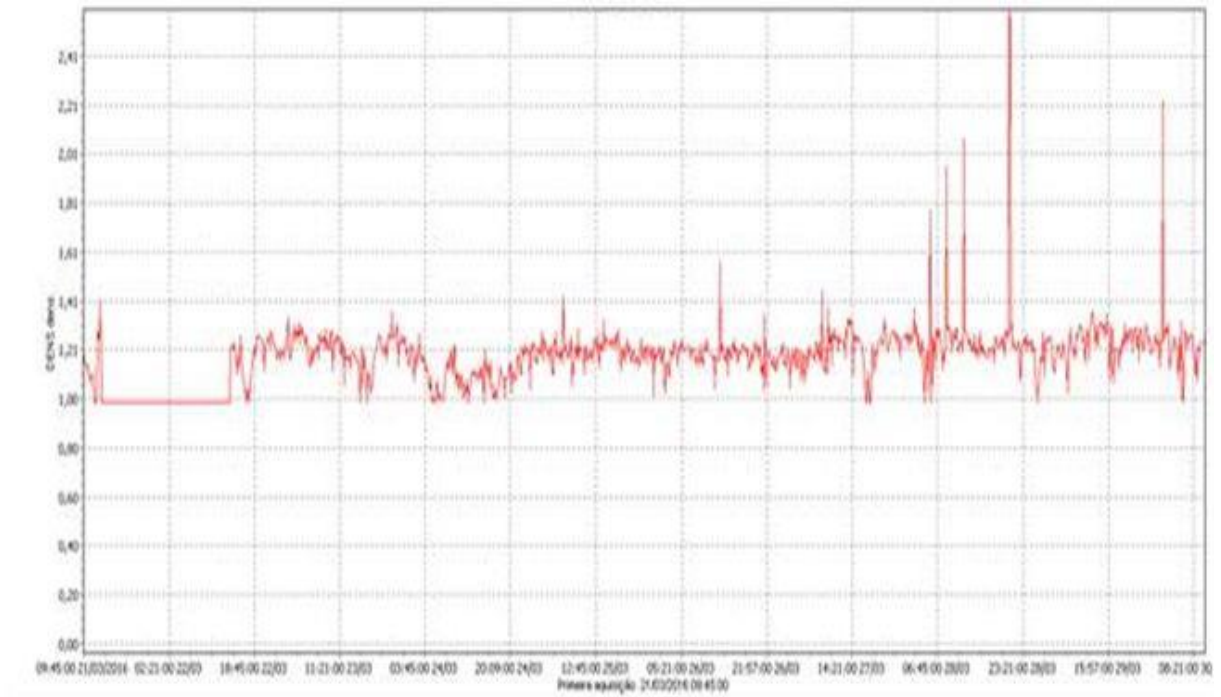
Figura 40 - Gráfico densidade registrada em operação (Período de 04 dias a partir de 18/03)



Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico em questão, figura 40, a densidade registrada durante 04 a 05 dias consecutivos, variou sem controle. Algumas medições pontuais do Laboratório retirando amostras para comparação foram oportunas, pois, ajudaram no refinamento da calibração do MD-01LP no local.

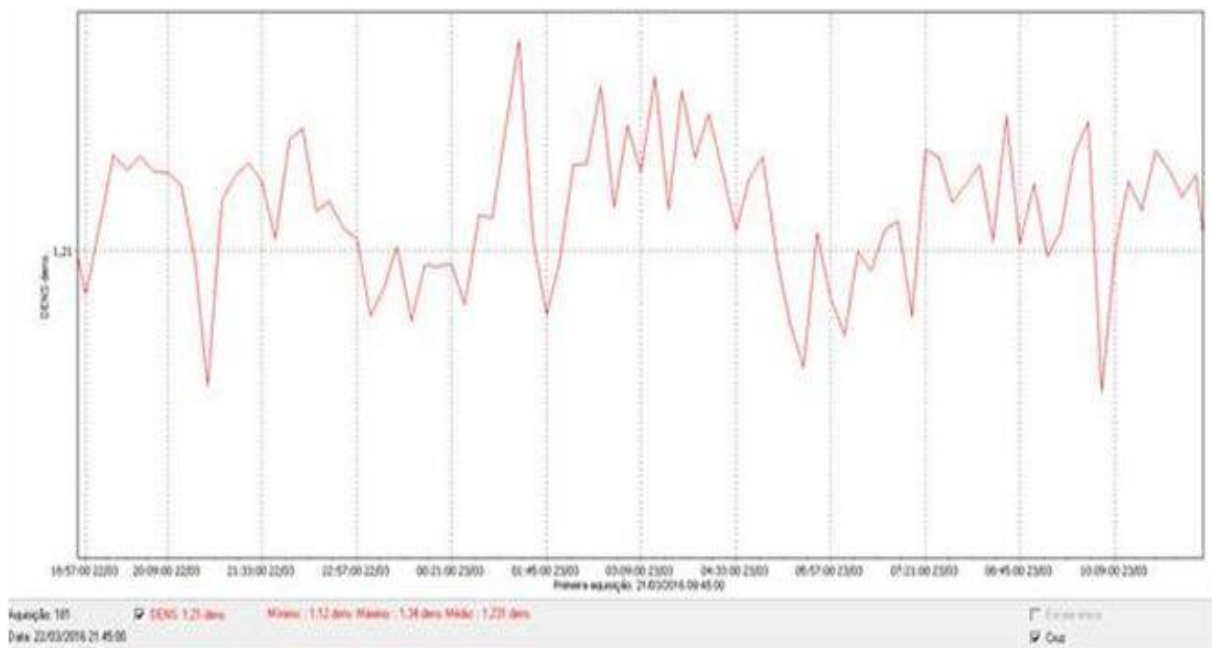
Figura 41- Gráfico densidade com registro na operação (Período 09 dias, a partir de 21 a 30/03)



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente, na indicação da densidade 1,00 por 01 dia corrido, (21 a 22) conforme mostrado no gráfico acima, fig. 41, constatou-se que a linha de produção estava parada por problema interno de manutenção. Os 05 picos mostrando, densidade 1,80, 1,90, 2,04, 3,00 e 2,21, são pontos interpretados como ruídos aleatórios ou por influencia provável devido a picos de espuma muito espessa, no nível do tanque o que pode provocar a perda do eco do medidor ultrassônico de nível.

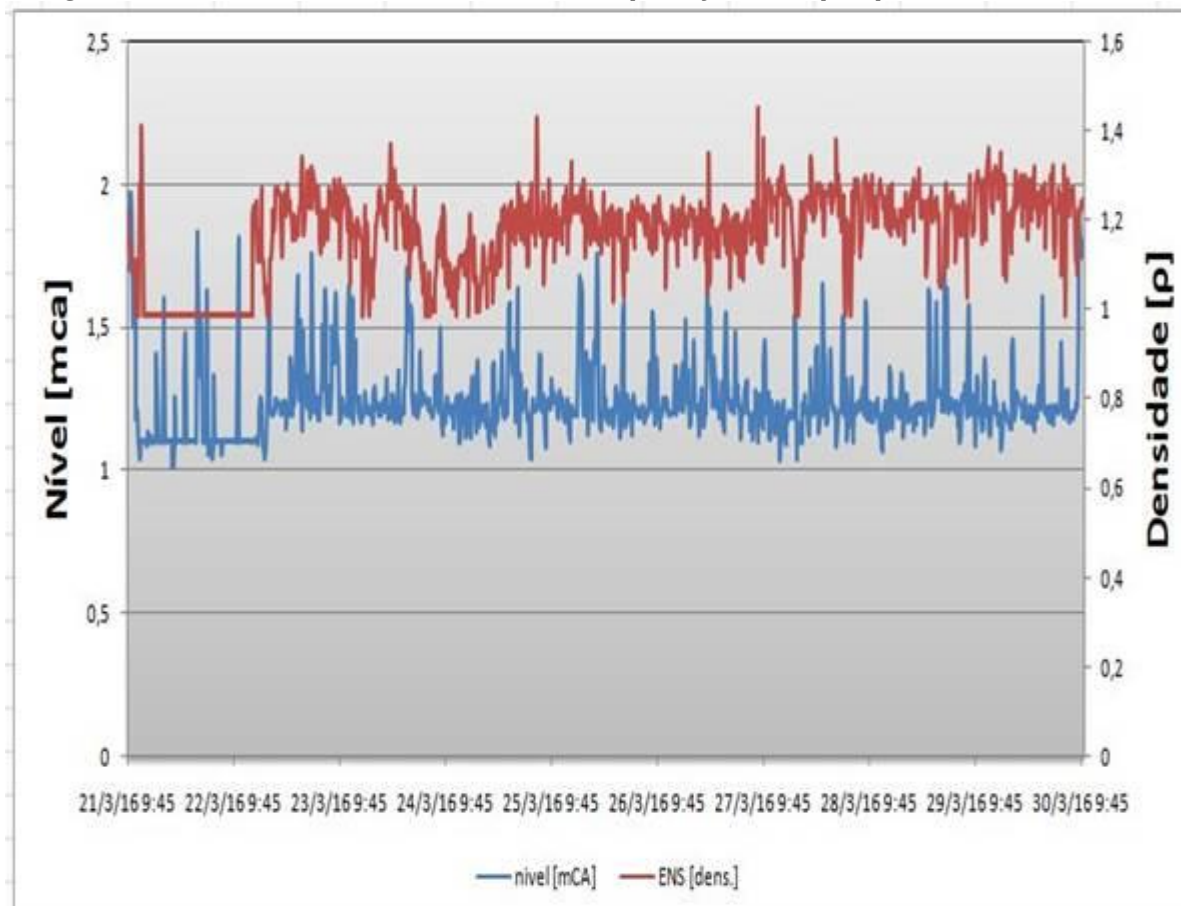
Figura 42 - Gráfico expandido (espectro), da densidade



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico da figura 42 é o registro de um dia, 24 horas, retirado da figura 41, exatamente no dia 22/03/17. O gráfico foi expandido e apresentado como resultado da variação no período, densidade mínima, densidade media e densidade máxima, respectivamente 1.120, 1.201, 1.340.

Figura 43 - Gráfico densidade e nível operação tanque período de 09 dias

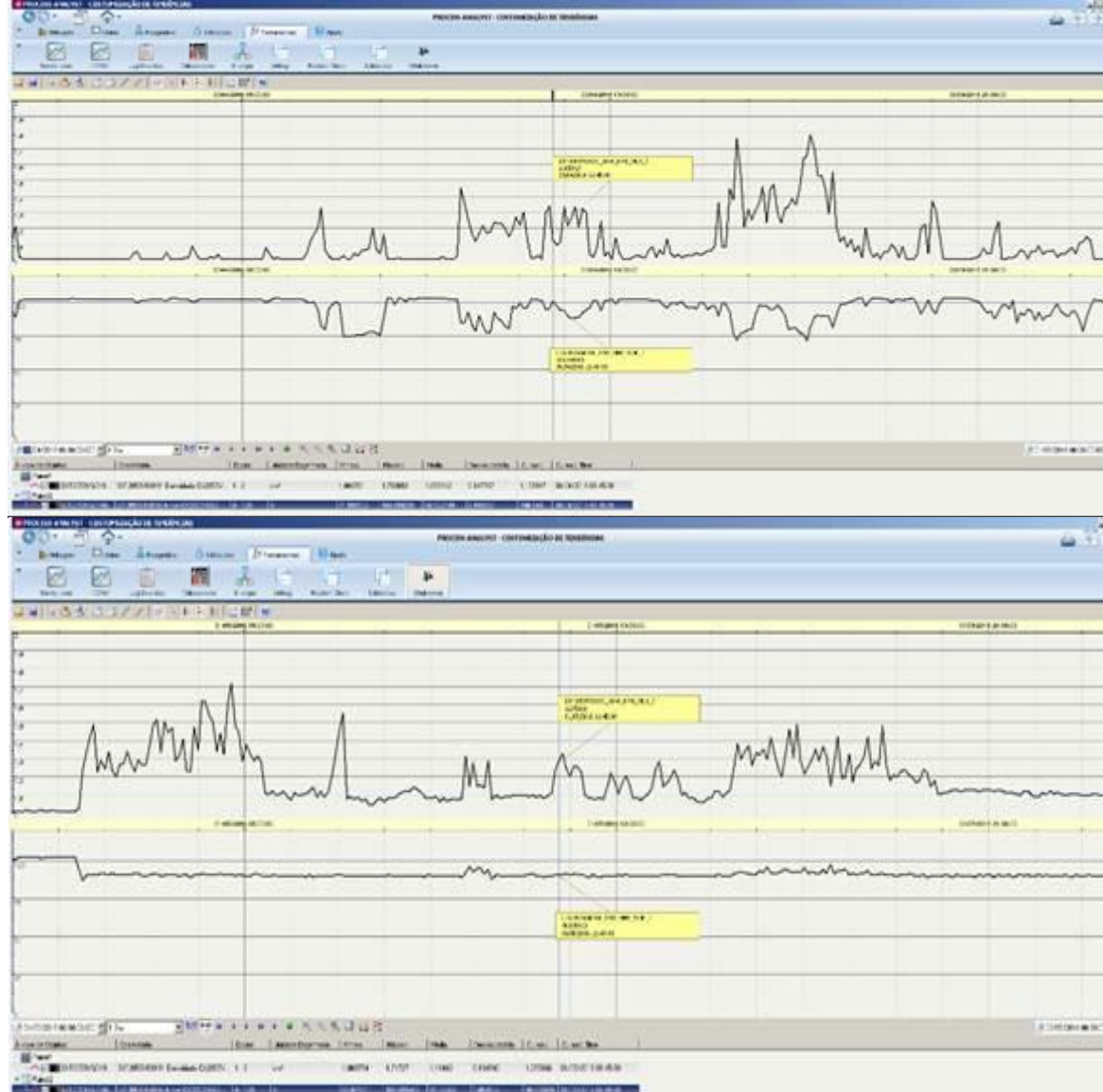


Fonte: Elaborado pelo autor

Na junção dos gráficos (FIG. 43), densidade versus nível, os picos da variação brusca da densidade mostrada no gráfico da figura 23, 05 picos registrados durante processo de 09 dias corridos, considerados como possível ruído ou causa aleatória desconhecida, foram retirados por ocasião da junção dos dois registros do gráfico de junção acima.

(Período de registro, 09 dias, dias 21 a 30/03/16)

Figura 44 - Gráfico dois períodos de 24 horas densidade/nível. PLC-CCO Vale



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 44 representa dois gráficos de períodos distintos da operação do tanque de homogeneização da densidade baixado do Centro de Controle Operacional, (CCO), da Cia Vale para onde o MD-01LP enviou sinal de 4,00 a 20,00 mA equivalente a densidade medida no tanque. O sinal de nível era operado, controlado e registrado no próprio CCO- Vale, porem, entrava no MD-01LP com sinal de 4,00 a 20,00 mA referente ao nível medido.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No setor ou área de medição da densidade, em linha, da polpa de minérios em geral, ou de outras densidades que não a mineraria, varias e novas tecnologias estão se apresentando como alternativa, anteriormente já mencionadas. O propósito, é atender a área de medição e controle, que posteriormente, a partir da medição e talvez seu controle, segue outras operações como diluição, flotação, concentração, transporte, etc. Cada tecnologia tem sua particularidade atendendo casos e faixa de densidade específica. Com a tecnologia radioativa, que por seu lado, depende de se ter tubulação sempre cheia no escoamento e também existir trecho reto para sua instalação. Já o MD-01LP não tem qualquer restrição de outras variáveis que possam interferir na medição, além de estar medindo a densidade no local onde ela é dosada e controlada. Assim entendemos que o MD-01LP é um equipamento medidor transmissor novo e inédito como densímetro da polpa de minério em linha ou não, assim como, podendo ser instalado para medição de novos tipos de produtos líquido ou pastoso que necessitam medição e controle em processos, tipo batelada ou em linha através do tanque de dosagem.

O MD-01LP, além de ser inovador no setor da medição de densidade, é um equipamento que cientificamente e tecnicamente estará a contribuir para a universalidade da medição da densidade, em tempo real, no processo coadjuvante para a concentração do minério de ferro, ou outra qualquer densidade de solução aquosa, pois sua estrutura permite toda e qualquer parametrização necessária, atendendo as mais diversas condições métricas dos mais diversos modelos e dimensões de tanques, assim como, valores ou faixa de densidade a ser medida, sinal de saída, etc. A contribuição científica e técnica do MD-01LP não está somente na sua originalidade da medição de densidade, pois, por ser um equipamento micro processado, com entrada, processamento, indicação e saída de sinal, poderão pela simples reprogramação do seu *“firmware”* se transformar em um novo equipamento distinto de seu propósito inicial, tornando-se assim, um novo e original equipamento medidor. Por exemplo, na área da medição de escoamento, pressão, temperatura, etc. Desta forma, entendemos que nesse projeto reside a nossa contribuição científica e técnica onde novos estudos de melhorias ou novas alternativas de medição poderão ser implementadas, buscando medir outras variáveis diversas encontradas no processo industrial, com um custo inferior aos equivalentes ou

proponentes medidores existentes no mercado ou em apresentação que buscam também, por exemplo, homologação nesse setor.

Como observação final, acrescentamos que o MD-01LP teve sua solicitação de patente requerida pela PUC MINAS, com entrada no INPI através do processo BR 10 2015 025215-3 GRU nº 0000221.

Olhando para o futuro bem próximo, fica aqui gravada a oportunidade para o desenvolvimento de novos projetos ou modelos, aproveitando a estrutura eletrônica já desenvolvida, onde se pode ter um, dois ou mais sinais de entradas vindos de processos da medição industrial, convertendo e ou processando tais sinais para uma indicação local com ou sem saída analógica ou digital representando uma soma, subtração, multiplicação ou divisão para o respectivo registro ou mesmo o controle.

Como observação, dentro da mineração, existe demanda para o desenvolvimento de novos equipamentos para a medição e o controle do nível de silo de armazenamento de minério fino ou pelotas para o enchimento de vagões. Ainda, na mineração, como nova demanda, é interessante medir e indicar o volume das pilhas de minério ou pelotas no pátio de estocagem. Uma nova oportunidade de altíssima e relevante importância é o estudo e o desenvolvimento da estratégia de medição e o efetivo controle da densidade dentro do moinho em operação de moagem.

Nas cervejarias, também existe aplicações e demanda a serem desenvolvidas para os silos de estocagem, tinas de cozimentos e tanques de fermentação, etc, etc.

Nas fábricas de celulose e papel o potencial é também de grandes oportunidades. Assim sendo, fica aqui a sugestão para o estudo e desenvolvimento dessa nova topologia e programas dentro do que foi apresentado, para o atendimento industrial na medição e controle de variáveis outras que ainda carecem de pesquisas e desenvolvimento. Ainda como observação, o MD-01LP pode também com relativa facilidade, ser transformado em um novo equipamento denominado datalogger duplo de pressão manométrica, indicando e registrando em memória interna, pressão a montante e a jusante em sistemas de controle de abastecimento de água por meio de válvulas redutoras de pressão, (VRP), as quais atuam no controle automático da pressão regional na distribuição, e ou vazão. Nessa linha de raciocínio sua função como agente na calibração dessas VRP torna-se um agente de altíssima importância.

RESULTADOS FINAIS

Nesse tópico são apresentados discussões, conclusões preliminares e comentários extraídos dos gráficos e resultados comparativos nas medições de laboratório e medições pontuais no processo onde o MD-01LP esteve instalado. Levando-se em conta o que foi apresentado e observado na investigação e estudo do equipamento em laboratório e processo real na mineração, tema central dessa dissertação e, ainda, em vista dos argumentos de sua necessidade e aplicação imediata, pode-se inferir que o MD-01LP está na direção certa de sua aplicação e uso na prática das medições, tanto na mineração quanto em sistema de produção de outros produtos, onde se deseja e necessita medir e controlar a densidade, por batelada ou em processo de operação contínua, em linha.

Graficamente nessa dissertação, podemos observar que os resultados das medições e registros preliminares em laboratório, foram de alto desempenho, em registro apresentado pelo “*datalogger*”, durante toda extensão das medições experimentais com densidade impostas ao processo com registros de 20 em 20 segundos. Por outro lado, observamos ainda que, com a densidade estabelecida, não houve sequer, variações da mesma no decorrer da variação do nível no tanque de simulação em toda sua extensão, de mínima a máxima e vice-versa, conforme gráficos das figuras 36, 37, 38 e 39.

Já no processo, os resultados foram animadores e confiáveis, com registros de 10 em 10 minutos para o gráfico com duração de 04 a 05 dias e de 15 em 15 minutos para o gráfico de 09 dias corridos. Erro instantâneo levantado no primeiro gráfico foi igual a 0,84%. No segundo gráfico de 09 dias, considerando uma média gráfica de 24 horas de registro, especificamente do dia 30/03/2016, o erro médio ficou na casa de 0,17%. Observa-se que os erros aqui declarados foram entre a indicação instantânea do MD-01LP e a média de 03 amostras retiradas no tanque e pesadas localmente havendo em seguida a comparação. Concluímos então que, na prática da medição no processo real da mineração, tarefa conclusiva, conforme gráficos das figuras 40, 41 e 42, 43 onde o MD-01LP desempenhou seu papel principal na indicação e transmissão das medições, enfrentando toda espécie de intempérie como; ruídos elétricos, agressividades do meio, com umidade elevada e poeira em profusão, variações acentuadas no processo, variações de temperatura, turbilhonamento no tanque de homogeneização, às vezes, com espuma, e variações

bruscas do nível, respondeu com desempenho, exatidão e repetibilidade. Este foi o primeiro trabalho nesta linha de estudo e testes no processo da medição e transmissão de sinal na mineração, onde o projeto e sua construção, após apresentação e acolhimento, poderão receber futuramente sua homologação. A oportunidade da operação extra-oficial foi avaliada e discutida pelo titular da manutenção elétrica e instrumentação da Usina. Observa-se aqui que o teste ora realizado, nessa primeira fase, não foi de caráter oficial. Para se obter a acreditação e homologação final será necessário um novo processo qual seja a oficialização documental com anuência do setor de engenharia geral da unidade diretora. O equipamento em si, construído com o melhor custo/benefício entre todos os demais concorrentes que disputam o mesmo mercado na mineração, está hoje, na mesma plataforma dos demais, aguardando parecer quanto sua operosidade e posterior homologação. Desta forma, estamos no caminho certo em atender o propósito inicial do projeto que mostrou e obteve seus primeiros resultados e frutos, em laboratório de testes, e na mineração propriamente com a oportunidade que lhe foi dada de ser instalado onde, mostrou seu desempenho, alcançando como esperado seu primeiro e feliz resultado positivo, nesse início de operação histórica em 18 de março de 2016 conforme sua instalação, fig. 25 e 26, na usina de processamento de Minério de Ferro em Várzea Grande, distrito de Itabirito - Minas Gerais.

FINALMENTE

Finalizando o projeto, e a dissertação, fundamentamo-nos em um texto antigo e Bíblico que diz:

Concentramo-nos naquilo que poderá ser feito e não no que se deixou de ser feito. Esqueçamos o que ficou para trás e esforçamo-nos para alcançar o que está adiante.

Aluno: Geraldo P. S. Lamon.

=====

REFERÊNCIAS

ABDULAGATOV, Ilmutdin M. et al. **Measurements of the density, speed of sound, viscosity and derived thermodynamic properties of geothermal fluids from south Russia Geothermal Field. Part II**, Applied Geochemistry Vol. 69, Pag. 28-41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.04.003>, 2016.

ALVES, Evaristo Orella. **Medição continua de densidade e concentração em processos industriais**. Instrumatic Instrumentation Experts, 11 jan. 2012. Disponível em: <<http://www.instrumatic.com.br/artigo/medicao-continua-de-densidade-e-concentracao-em-processos-industriais>>. Acesso em: jan. 2016.

ALVES, Francisco. Setor privado já compete com as estaduais no saneamento. **Saneamento Ambiental**, Ano 24, n. 176, p. 6, set./out. 2014. Disponível em: <<http://www.signuseditora.com.br/SA/revista/176/>>. Acesso em: jan. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: **Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

AMIRIA Ali et al. **Standard density measurement method development for flax fiber**, Industrial Crops and Products Vol. 96 Pag. 196–202, <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.060>, 2016.

ARMAN, Akiko; OKADA, Hiromichi Takebe. **Density measurements of gasified coal and synthesized slag melts for next-generation IGCC**, Fuel Vol. 182 Pag. 304–313, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.117>, 2016.

AZEVEDO NETTO, Jose Mariano. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

BERGQUIST, Bjarme. Traceability in iron ore processing and transports. **Minerals Engineering**, v. 30, p. 44-51, Apr. 2012.

BOZZOLA, Antônio Ricardo. **Bombeamento de polpa de minério de ferro via mineroduto**. Scrib, 2016. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/290137679/Bombeamento-de-Polpa-de-Minerio-de-Ferro-via-Mineroduto>>. Acesso em: jan. 2016.

BRISTOL BABCOCK. **A guide for the reliable installation of telecontrol instrumentation**. Buckingham Street: Bristol Babcock, 2013.

BUMBERGER, Judith A.; GREENWOOD, Margaret S. Measuring fluid and slurry density and solid concentration non-invasively. **Ultrasonics**, v. 42, n. 1-9, p. 563-567, Apr. 2004.

CRANE CO. **Flow of fluids: through valves, fittings, and pipe**. Chicago: Crane, 1969.

DELMEE, Gerard J. **Manual de medição de vazão**. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 1995.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1975.

FURUSAWA, Takehiko; SMITH, J. M. Fluid-particle and intraparticle mass transport rates in slurry. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 12, n. 2, p. 197–203, 1973.

FURTADO, A. et al. **The importance of the use of adequate reference materials in density measurements performed in hemodialysis treatments**, Measurement Vol. 79, Pag. 349–353, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.032>, 2016.

GILES, Ronald V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1967.

GOMES, Heber Pimentel; CARVALHO, Paulo Sérgio de (Org.). **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética**. João Pessoa, PB, Editora Universitária UFPB, 2009.

GOMES, Reinaldo Brandão; TOMI, Giorgio de; ASSIS, Paulo S. Iron ore tailings dry stackings in Pau Branco mine. **Journal of Materials Research and Technology**, 10 jun. 2016.

GREENWOOD, M. S. *et al.* On-line ultrasonic density sensor for process control of liquid and slurries. **Ultrasonics**, v. 37, n. 2, p. 159-171, Feb. 1999.

GREENWOOD, Margaret S.; BUMBERGER, Judith A. Measurement of viscosity and shear wave velocity of liquid or slurry for on-line process control. **Ultrasonics**, v. 39, n. 9, p. 623-630, Aug. 2002.

GREENWOOD, Margaret S.; BUMBERGER, Judith A. Ultrasonic sensor to measure the density of a liquid or slurry during pipeline transport. **Ultrasonics**, v. 40, n. 1-8, p. 413-417, May 2002.

GRONNER, Alfred D. **Análise de circuitos transistorizados**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1973.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. Rio de Janeiro: INMETRO, 1995.

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **Industrial measurement series**. Research Triangle Park: ISA, 1996.

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **Pressure: industrial measurement series**. Research Triangle Park: ISA, 1988.

JAKSIC, Nikola; SCARABOSIO, Andrea; MEISTER, Hans, **Pressure gauge filament for neutral gas density measurement using alternating current as source power**, Fusion Engineering and Design Vol. 115 Pag. 1–5,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.12.023>, 2016.

KIMEL, Shani; ABBOUD, Shimon; ARAD, Marina. Parametric electrical impedance tomography for measuring bone mineral density in the pelvis using a computational model. **Medical Engineering & Physics**, v. 38, n. 8, p. 701-707, Aug. 2016.

KLINE, S.J.; MCCLINTOCK, F. A. Describing uncertainties in single-sample experiments, **Mechanical Engineering**, v. 75, p. 3-8, Jan. 1953.

LAMON, Geraldo P. S. **Pitometria e Macromedicação nas Empresas de Saneamento**. 2. ed. Belo Horizonte: Lamon Produtos, 2004.

LIANG, Li-Ping *et al.* Statistical modeling and signal reconstruction processing method of EMF for slurry flow measurement. *Measurement*, v. 54, p. 1-13, Aug. 2014.

LIMA, Hildebrando de *et al.* **Pequeno dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1943.

LOWENBERG, Edwin C. **Circuitos eletrônicos: resumo da teoria: 86 problemas resolvidos: 171 problemas propostos**. Rio de Janeiro: Mcgraw-Hill do Brasil, 1971.

MACHADO, Luiz Henrique Jorge. Densímetro não radioativo, com amostragem a vácuo para líquidos. **Minérios & Minerais**, Ano 39, n. 370, p. 35, maio 2015.

METSO. **Moinho de bolas**. Disponível em:
<<http://www.metso.com.br/produtos/moagem/moinho-de-bolas>.
Acesso em: jan. 2016.

MICHAELIS, H. **Moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 1998.

MILLMAN, Jacob; HALKIAS, Christos C. **Integrated electronics: analog and digital circuits and systems**. New York: McGraw-Hill, 1972.

OLIVEIRA, Renata F. **Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas**. 2012. Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Minas, Belo Horizonte, MG, 2012.

PERTENCE JÚNIOR, Antônio. **Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório**. 5. ed. São Paulo: Makron, 1996.

PUSTOGVAR, A.; KULYAKHTIN, A., **Sea ice density measurements**. Methods and uncertainties, *Cold Regions Science and Technology* Vol. 13, Pag. 46–52, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.001>, 2016.

REMIORZ, Leszek; OSTROWSKI, Piotr. **An instrument for the measurement of density of a liquid flowing in a pipeline**, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 41, Pag. 18–27, <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.003>, 2015.

REN, Ruiqi et al. **The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and in situ probe spacing correction methods**, *Agricultural and Forest Meteorology* Vol. 232, Pag. 176–185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.009>, 2017.

ROSS, P. S.; BOUURKE, A. **High-resolution gamma ray attenuation density measurements on mining exploration drill cores, including cut cores**, *Journal of Applied Geophysics* Vol. 136, Pag. 262–268, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.11.012>, 2017.

SAMPAIO, João Alves; SILVA, Fernando Arruda. **Determinação da densidade de sólidos e polpa**. In: LUZ, Adão Benvindo da; POSSA, Mario Valente; ALMEIDA, Salvador L.M. de. **Tratamento de minérios**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 1998. p. 36-51.

SÁNCHEZ, L. C. C.; MATSUSHITA, Koji; PONS, F. C. Moagem e moinho. São Paulo: Votorantim, 1990.

SARDINHA, Oscar; SILVA, Antônio Carlos da; CARNEIRO, Benomil. Invenção de um novo dispositivo para medidas de densidade por amostragem de polpa de minério na Mineração Caraíba. **Minérios & Minerales**, 14 maio 2013. Disponível em: <<http://www.minerios.com.br/Conteudo/Arquivos/Mat%C3%A9rias/Processo%20-%20Minera%C3%A7%C3%A3o%20Cara%C3%ADba.pdf>>. Acesso em: jan. 2016.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth Carless. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

SISTEMA do complexo Minas-Rio alcançou 72% executados. **Minérios & Minerales**. Disponível em: <[http://www.minerios.com.br/Edições Int/854/26/Sistema_do_complexo_MinasRio_alcançou_72_executados.aspx](http://www.minerios.com.br/Edições%20Int/854/26/Sistema_do_complexo_MinasRio_alcançou_72_executados.aspx)>. Acesso em: jan. 2016.

SMAR. **Transmissor de concentração e densidade DT-301**. Sertãozinho, SP: Smar Equipamentos Eletrônicos. Disponível em: <http://www.smar.com/brasil/produto/dt301-transmissor-de-densidade-4-a-20-ma-hart>. Acesso em: jan. 2016.

SOBRINO, Manuel et al. **Viscosity and density measurements of aqueous amines at high pressures: MDEA-water and MEA-water mixtures for CO₂ capture**, *J. Chem. Thermodynamics* Vol. 98, Pag. 231–241, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2016.03.021>, 2016.

SPINK, L. K., **Principles and practice of flow meter engineering**. 9. ed. Massachusetts, The Foxboro Company, 1967.

SWR ENGINEERING. **Measuring systems for the solid handling industries**. Disponível em: <<https://www.swr-engineering.com/en/products.html?cHash=9f4edbc710e8178bb8b3025ca5105759>>. Acesso em: jan. 2016.

THE FOXBORO COMPANY, **Fundamentals of operational Amplifiers**.

Massachusetts: Foxboro Educational Service, 1973.

VENNARD, John K. **Elementary fluid mechanic**. 4. ed. New York: John Willey & Sons, 1961.

VIANNA, Marcos Rocha. **Mecânica dos fluidos para engenheiros**. 4. ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 2001.

WANG, Fei; THREATT, Timothy J.; VARGAS, Francisco M., **Determination of solubility parameters from density measurements for non-polar hydrocarbons at temperatures from (298-433) K and pressures up to 137 MPa**, Fluid Phase Equilibria Vol. 430, Pag. 19-32, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2016.09.021>, 2016.

WIEDEY, Raphael; KLEINEBUBBE, Peter, Infrared thermography — **A new approach for in-line density measurement of ribbons produced from roll compaction**, Powder Technology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.052>, 2017.

ZHAO, Libo et al. **Density measurement sensitivity of micro-cantilevers influenced by shape dimensions and operation modes**, Sensors and Actuators B Vol. 245, Pag. 574–582, <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.201>, 2017.

APÊNDICES A - Ficha técnica – MD-01LP

Medidor de densidade da Polpa de minério



Fonte: Elaborado pelo autor

Características técnicas:

Caixa plástica ABS a prova de Água

Grau de Proteção: IP67

Temperatura de Operação: 0 a 60 °C

Alimentação: 90 a 240 Vac – fonte interna-externa

Variável de Entrada: 4,00 a 20,00 mA – Nível/Pressão com indicação no

Display em metros de CA, configuráveis

Faixa de Medição Densidade: Configurável - (p. ex. 1,00 a 3,00)

Resolução na Indicação: Centésimos – 1,00 a 3,00

Sinal de Saída: 4,00 a 20,00 mA

Display: Alfanumérico, duas linhas 16 colunas

Configuração: Up, Down, Ok e Menu

Cut Off: Configurável

Fator de Ajuste no cálculo da Densidade: +/-1.000-Variável em milésimos

Exatidão: 0,7% FS (Dependendo da Exatidão das Variáveis de Entrada)

Acessórios: Cabo de Alimentação

Dimensões: 16 x 12 x 10 cm

Peso: 0,6 Kg

APENDICE B - Comentário sobre a operação do MD-01LP no processo

No gráfico apresentado (FIG. 40) com registro consecutivo de 04 a 05 dias corrido, logando e registrando a densidade, no tanque, apresentado nas figuras 25 e 26, onde se podem ver as variações da densidade com pico de mínima, 1,00 a pico de máxima de 1,41. Tais variações estão amparadas pelo não controle da densidade que tem para o aludido tanque, apenas o controle do nível estabelecido pela Sala de Controle que através do PLC central onde se monitora e controla o nível, atuando automaticamente na velocidade da bomba de polpa e ou na água admitida. Nos dois primeiros gráficos, não aparece o registro do nível, fato que só vai aparecer no gráfico (FIG. 43), onde por um período maior de 09 dias corridos, registrou-se também, pelo MD-01LP, o nível e a densidade.

A exatidão da medida no gráfico do dia 18/03/2016, pela parte da tarde, foi a comparação da medição da densidade da polpa, pelo laboratório, que num determinado horário, mediu a densidade pela pesagem de 03 amostras, obtendo-se a média de 1,19, enquanto que o MD-01LP mostrava em seu “*display*” uma densidade de 1.20 e o seu respectivo registro no gráfico apresentado na figura 41, ou 42, portanto, um erro muito baixo. No gráfico, figura 42 a densidade média registrada num determinado instante, foi de 1.221 enquanto que a média de 03 medidas realizadas pelo laboratório naquele mesmo instante mostrou uma densidade de 1.218. Nesse mesmo tempo e intervalo, o registro da densidade pelo medidor do concorrente indicava e registrava uma densidade de 1,14. Erro exageradamente alto para padrões da empresa, ou seja, 6.40% para menos. Portanto, não se tem mais o que provar quanto ao desempenho do MD-01LP.

No gráfico da figura 44 temos o registro da densidade e nível baixado do Centro de Controle Operacional da Cia Vale (CCO) onde a medição e o controle do nível são feitos pelo Supervisório Cia Vale. Já a densidade da polpa é medida e transmitida pelo MD-01LP, para seu respectivo registro no CCO - Vale.

APÊNDICE C - Observações gerais

Ainda, na mineração, o MD 01LP, será instalado oportunamente em um tanque particular, Cia Samarco Mineração, (assim que ela voltar a operar), onde se diluí a polpa, num processo de diluição, com controle ou não, onde a densidade pode flutuar. Nesse caso particular sem controle da densidade, apenas o nível do tanque é mantido sobre controle pela modulação da água admitida. Durante o processo de diluição da polpa e sua respectiva medição pelo MD-01LP, as variáveis, nível e densidade serão registradas por meio de “*Datalogger*”, devidamente programadas para tal fim. O registro a ser apresentado pelo gráfico, oportunamente gerado por ocasião de sua instalação, será apresentado e comentado com as devidas observações do seu desempenho operacional assim como o foi no caso Vale. Em outro caso particular de mineração, provavelmente numa outra unidade da Cia. Vale, onde o MD-01LP, deverá ser instalado em um determinado tanque, definido pela gerência do processo, onde a duração prevista será definida pela própria empresa, com intervalo de aquisição de +/-5 a 10 minutos por ponto dependendo da quantidade de dias ou semanas de registro. Espero poder dizer ou informar que o MD-01LP atingirá também seus objetivos de desempenho operacional em todos seus aspectos do teste de operação. Em outro teste de desempenho para homologação onde há grande possibilidade de sua instalação será na Usina da CBMM – Araxá - MG.

APENDICE D - Surgimento de um novo equipamento – MD-02LP

É oportuno nessa dissertação observar que o medidor de densidade MD-01LP, depois que passar por todos os testes de operação dentro da indústria de processamento, Cia Vale e Samarco, recebendo o seu certificado de conformidade e homologação se vai, imediatamente aproveitar sua estrutura eletrônica de processamento de sinais, reprogramando-a para nascer como outro novo modelo de equipamento, qual seja; MQ-02LP (Medidor Transmissor de Vazão em Canais Aberto e ou Vertedor). O MQ-02LP, receberá sinal de 4 – 20 mA ou sinais de mV, equivalente a uma altura da lâmina d'água bruta escoante, oriunda de uma captação, um rejeito de mineração, rejeito industrial, ou esgoto, escoante por canais abertos, canais de Parshall e ou vertedores, os quais estarão listados na biblioteca interna do MQ-02LP, com suas respectivas equação matemática pertinente. A partir da equação escolhida ou selecionada, calculará a vazão automaticamente, mostrando o resultado em seu “*display*”, nas unidades de vazão a ser escolhida como, l/s, m³/s, ou m³/h, podendo ainda ter como sinal de saída para registro externo, 4,00 a 20,00 mA e, ainda mostrar em seu “*display*”, totalização da vazão escoante em metros cúbicos (m³).

Bibliotecas, fórmulas matemáticas de vazão em canal

Elemento Primário	Autor	Fórmula
Vertedor Triangular $\theta = 90^\circ$	Thompson	$Q=1,367 \cdot \sqrt{Hc^5}$ (08)
Vertedor triangular $60^\circ < \theta < 90^\circ$	Thompson	$Q=1,40 \cdot \sqrt{Hc^5}$ (09)
Vertedor Retangular	Francis	$Q=1,838 \cdot Lc \cdot \sqrt{Hc^3}$ (10)
Vertedor Trapezoidal	Cipoletti	$Q=1,860 \cdot Lc \cdot \sqrt{Hc^3}$ (11)
Vertedor Circular	G. Lamon	$Q=Am \cdot C \cdot \frac{\sqrt{2g \cdot Hc}}{2,04}$ (12)
Canal Livre Retangular	G. Lamon	$Q=Lc \cdot Hc \cdot R_H^{2/3} \cdot \frac{\sqrt{I}}{\lambda}$ (13)
Canal Livre Circular	G. Lamon	$Q=R \cdot \theta \cdot R_H^{5/3} \cdot \frac{\sqrt{I}}{\lambda}$ (14)
Canal de Parshall	Parshall	$Q=K \cdot Hc^n$ (15)
Parshall fora do Padrão	Azev.Netto	$Q=2,18 \cdot Lc \cdot Hc^{1,5}$ (16)
Canal Livre Trapezoidal	G. Lamon	$Q=Am \cdot R_H^{2/3} \cdot \frac{\sqrt{I}}{\lambda}$ (17)

Fonte: Elaborado pelo autor

Cumprе ressaltar e observar que as formulas a serem lançadas no programa, “firmware” do novo equipamento, MQ-02LP, listadas e gravadas internamente, são formulas de autores diversos, com exceção das 04 fórmulas reivindicadas pelo autor. Duas delas, de grande complexidade, com cálculo de difícil solução, principalmente a solução integral a qual permaneceu insolúvel, literalmente desde sua formatação, ano de 2001/2002 até a data de 2014/2015 quando a solução pela integral foi de fato pesquisada e encontrada. Nos anos anteriores, por falta da solução pela integral formulada, a solução veio por meio da trigonometria, cuja comprovação e validação, aconteceram na prática de campo em medições comparativas entre o canal circular com o canal de Parshall em série mais a frente e, também pela medição manual e calculo em quatro oportunidades, duas em BH - Copasa, outra em Ouro Branco - Copasa e também uma em Araxá, na CBMM.

As formulas acima, hoje utilizadas, além de estarem na biblioteca do MQ-02LP, fazem parte também de um aplicativo do programa denominado MDE-2.0, (Medição de Esgoto), específico para medição do escoamento em canais abertos ou manilhas. As duas fórmulas, específicas para o vertedor circular e para o canal livre circular ou manilha, após sua comprovação da exatidão na medição prática de campo, foram registradas no Cartório Massote Betim-MG em 17/07/2003 sob nº. 371928. Já no ano de 2014/2015, as formulas trigonométricas, devidamente comprovadas no passado pela medição comparativa na pratica das medições, puderam ser hoje de fato e, definitivamente validadas e confirmadas pela solução da integral, resolvida com ajuda do professor Dr. Pedro Américo, Professor de Cálculo Numérico, PUC Minas, que depois de estudo da equação e tentativas em semanas diferentes, chegou à solução final da integral que por anos ficou latente, até então sem solução. O resultado dos cálculos comparativo entre a fórmula trigonométrica, ate então utilizada, com a integral, foi de total sucesso comparativo, que validou de vez a formula original trigonométrica.

Forma original;
$$Q = R_H . R . \theta . R_H^{2/3} . \frac{\sqrt{I}}{\lambda}$$
 18

$$\Theta = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{Hc}{R}\right) \quad R_H = \frac{R}{2} \left\{ 1 - \frac{\sin\left(2\cos^{-1}\left(1 - \frac{Hc}{R}\right)\right)}{2\cos^{-1}\left(1 - \frac{Hc}{R}\right)} \right\} \quad 19$$

Onde;

Θ = ângulo de abertura perímetro molhado

R = raio do canal circular

R_H = raio hidráulico

I = inclinação manilha/canal

λ = rugosidade do meio

H_c = variável independente (altura da coluna líquida)

Q = vazão m^3/s

Formula integral original formatada no ano de 2001/2002, ficando sem solução integral até 2015.

$$Q = \sqrt{2g} \int \sqrt{(R-x)(2Rx-x^2)} dx$$

20

x variando de 0 a H_c , H_c = altura da coluna líquida, C = constante $\leq 1,0$

Solução: Equação resolvida pelo Prof. Dr. Pedro Américo no ano de 2015

$$Q = \sqrt{2gH_c} \cdot C \cdot \left\{ \frac{1}{4} \pi R^2 - \frac{1}{2} \sqrt{-H_c(H_c - 2R)} \cdot R + \frac{1}{2} R^2 \arcsin \left(\frac{-R+H_c}{R} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{-H_c(H_c - 2R)} \cdot H_c \right\}$$

Equação

21

Nos resultados comparativos entre as duas equações, trigonométrica versus integral, o erro é zero, portanto, a equação trigonométrica ficou definitivamente validada matematicamente.

APÊNDICE E – Relacionamento com cliente usuário

Projeto de equipamento, execução e, sua operação nunca é estática, pois a eletrônica evolui rapidamente, assim como, a indústria de transformação, exigindo cada vez mais produtos com simplicidade na operação e manutenção fácil, conformidade do produto, repetibilidade e exatidão nas medições no processo de produção, e acima de tudo, preços cada vez mais competitivos. Com certeza, o projeto hoje apresentado como dissertação e, com programação para operar na indústria de mineração e, também em outras indústrias de transformação em condições de medições continua ou por batelada, tendo por finalidade testes para homologação, sofrerá críticas de projeto, de estética, operação, manutenção, apresentação dos resultados, etc. As críticas sempre serão bem-vindas. Estarei sempre atento e aberto às mesmas, vindas de parceiros, clientes, colaboradores, professores e alunos, pois é intenção a busca da melhoria continua dos produtos fabricados. O sucesso de um empreendimento está em inovar e atualizar-se sempre, buscando com isto, vantagem competitiva no mercado que atua. Enxergar oportunidades que os outros não enxergam e, especialmente proporcionar ao usuário, um diferencial no atendimento, de modo que o consumidor final possa tranquilamente adquirir, utilizar e manter uma satisfação de uso por longo período e, ainda, valorizar o novo produto adquirido frente ao mercado. Relacionamento entre fornecedor e cliente não nasce de um dia para o outro, pois requer certo amadurecimento, reconhecimento e confiabilidade, principalmente tratando-se de um produto cuja operação irá interagir com a conformidade de produção de sua indústria de transformação.

Treinamento dos clientes e rápida manutenção quando necessária ou exigida, faz com que todos sejam e tenham uma fonte de vantagem competitiva nos negócios a curto e longo prazo.

Finalizando no tema, “relacionamentos com o cliente usuário”, cita-se a eloquente expressão de grande alcance, dita por Dr. Antonio Ermírio de Moraes,

Dentro de uma Organização ou Empresa, o seu Poder Econômico e Financeiro muitas vezes são circunstanciais. Numa hora o Poder está em minhas mãos, em outro momento, está nas mãos do concorrente. Tudo dependerá da Empresa ou de todos que nela exercem suas Atividades, especialmente da Equipe Gerencial. Não há uma segunda oportunidade. É fatal: Ou você vence ou você sucumbe. A vitória é uma obrigação perante a família, perante a Sociedade, e perante a Energia e leis desse Planeta, senão seremos todos uns fracassados!