



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de
Processos de Mineração - PROFICAM
Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas
Associação Instituto Tecnológico Vale - ITV**

Dissertação

**QUANTIFICAÇÃO DE MAGNETITA EM PELOTAS DE MINÉRIO DE
FERRO POR MEIO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS**

Cristiano Lopes da Silva

**Ouro Preto
Outubro de 2018**

Cristiano Lopes da Silva

**QUANTIFICAÇÃO DE MAGNETITA EM PELOTAS DE MINÉRIO DE
FERRO POR MEIO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Linha de Pesquisa: Instrumentação

Orientador: Prof. D.Sc. Sávio Augusto
Lopes da Silva

Coorientador: Prof. D.Sc. Thiago Antonio
Melo Euzébio

Ouro Preto, MG – Brasil
Outubro de 2018

S586q

Silva, Cristiano Lopes da.

Quantificação de magnetita em pelotas de minério de ferro por meio de propriedades magnéticas [manuscrito] / Cristiano Lopes da Silva. - 2018. xvii, 72f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais. Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Pelotas. 2. Magnetita. 3. Teor. 4. Permeabilidade Magnética. I. Silva, Sávio Augusto Lopes da. II. Euzébio, Thiago Antonio Melo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 681.5:622.2

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

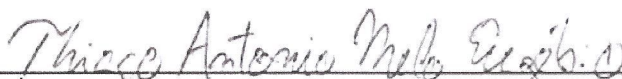
Quantificação de Magnetita em Pelotas de Minério de
Ferro por Meio de Propriedades Magnéticas

Cristiano Lopes da Silva

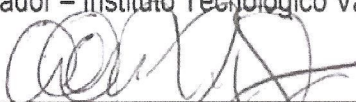
Dissertação defendida e aprovada em 09 de outubro de 2018 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



D.Sc. Sávio Augusto Lopes da Silva
Orientador – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Thiago Antonio Melo Euzébio
Coorientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)



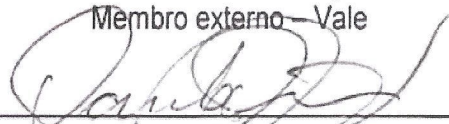
D.Sc. Alan Kardek Rêgo Segundo
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Agnaldo José da Rocha Reis
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



Ph.D. Valdirene de Gonzaga Resende
Membro externo – Vale



D.Sc. Paulo Raimundo Pinto
Membro externo – Instituto Tecnológico Vale

Aos meus pais.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família por todo carinho e apoio incondicional, nas pessoas da minha mãe, Sandra, da memória do meu pai, José Carlos, da minha avó, Maria Emília e do meu do irmão, Carlos Luciano.

Agradeço aos meus orientadores, o Prof. D.Sc. Thiago Euzébio e o Prof. D.Sc Sávio, por todos os ensinamentos, pelo suporte e pela amizade construída ao longo da pesquisa.

Agradeço aos amigos do mestrado, pelos momentos de estudos e de descontração. Agradeço também aos amigos de Ouro Preto, Mariana e região, pela presença e incentivo nos mais diversos momentos.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Instituto Tecnológico VALE (ITV) por toda estrutura fornecida e pelo ensino de excelência. Estendo os agradecimentos à todos os professores, pesquisadores e funcionários dessas renomadas instituições.

Agradeço à empresa VALE SA, por fornecer o suporte necessário à realização desta pesquisa.

Agradeço à CAPES e a Fundação Gorceix pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço à todos que, mesmo não citados nominalmente, contribuíram de alguma forma para a realização do mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à Escola de Minas/UFOP e ao ITV como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

QUANTIFICAÇÃO DE MAGNETITA EM PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO POR MEIO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Cristiano Lopes da Silva

Outubro/2018

Orientadores: Sávio Augusto Lopes da Silva

Thiago Antonio Melo Euzébio

Nesta dissertação, estão descritas as etapas de desenvolvimento de um protótipo de um medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro. O protótipo proposto utiliza o fenômeno físico da indutância mútua como princípio de funcionamento e realiza as medições com base em propriedades magnéticas das pelotas de minério de ferro. O processo de formação de magnetita em pelotas de minério de ferro ocorre no forno de endurecimento, a elevadas temperaturas. A presença de magnetita diminui a resistência física das pelotas produzidas. Logo, a determinação do teor de magnetita em pelotas queimadas fornece uma importante informação para o controle do processo da pelotização. Um controle adequado de temperatura do forno pode reduzir a quantidade de magnetita formada nas pelotas, além de reduzir o gasto energético com combustível, gerando ganhos financeiro e ambientais. O protótipo desenvolvido neste trabalho foi calibrado com amostras de pelotas de minério de ferro produzidas em uma planta de pelotização. Os resultados obtidos mostraram que o protótipo é capaz de estimar o teor de magnetita em amostras de pelotas de minério de ferro.

Palavras-chave: Pelotas, Magnetita, Teor, Permeabilidade Magnética.

Abstract of Dissertation presented to Escola de Minas/UFOP and ITV as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

QUANTIFICATION OF MAGNETITE IN IRON ORE PELLETS BASED ON MAGNETIC PROPERTIES

Cristiano Lopes da Silva

October/2018

Advisors: Sávio Augusto Lopes da Silva
Thiago Antonio Melo Euzébio

In this dissertation, the stages of development of a prototype of a magnetite content meter in iron ore pellets are described. The proposed prototype uses the physical phenomenon of mutual inductance as a working principle and performs measurements based on the magnetic properties of the iron ore pellets. The process of formation of magnetite in iron ore pellets occurs in the hardening furnace, at high temperatures. The presence of magnetite decreases the physical resistance of the pellets produced. Therefore, the analysis of magnetite content in pellets provides important information to control the pelletizing process. A suitable furnace temperature control can reduce the amount of magnetite formed in pellets, in addition to reducing the energy expenditure with fuel, generating financial and environmental gains. The prototype was calibrated with samples of pellets produced by pelletizing plant. The results showed that the prototype is capable of estimating the magnetite content in samples of iron ore pellets.

Keywords: Pellets, Magnetite, Content, Magnetic Permeability.

Lista de Figuras

2.1	Efeito de um material de elevada permeabilidade magnética sobre as linha de campo de um ímã permanente (BOYLESTAD, 2012).	7
2.2	Representação esquemática do alinhamento dos momentos magnéticos (LOWRIE, 2007).	9
2.3	Diagrama esquemático de um transformador elétrico (BOYLESTAD, 2012).	11
3.1	Aparato utilizado em titulometria (FOGAÇA, 2018)	13
3.2	Desenho esquemático do princípio de funcionamento de um Espectrômetro Mössbauer (PIRES, 2014)	14
3.3	Espectrômetro Mössbauer (NAVAŘÍK, 2018)	14
3.4	Imagem do equipamento Tubo de Davis (SEPOR, 2018).	15
3.5	Equipamento Satmagan (SYSTEMS, 2013)	16
3.6	Célula de amostra (SYSTEMS, 2013)	16
3.7	Desenho esquemático do equipamento desenvolvido pela pelotização da Vale	17
3.8	Fotografia do equipamento desenvolvido pela pelotização da Vale	18
3.9	Ponte LCR e bobina com núcleo de ar (SIMÕES <i>et al.</i> , 2014)	18
3.10	Gráfico de correlação (SIMÕES <i>et al.</i> , 2014)	19
3.11	Diagrama do medidor de susceptibilidade (SHANDLEY e BACON, 1966)	20
3.12	Curva de correção para medição (SHANDLEY e BACON, 1966)	20
3.13	Medidor de susceptibilidade (WALTER, 1972)	21
4.1	Fluxograma do processo de pelotização ((MARTIN) <i>apud</i> (COSTA, 2008)).	24
4.2	Etapas de formação de pelotas cruas (MEYER, 1980).	25
4.3	Representações esquemáticas do disco de pelotamento e do tambor de pelotamento (INFOMET, 2018).	25
4.4	Desenho esquemático das tecnologias de endurecimento de pelotas ((MORAES <i>et al.</i> , 2018) <i>apud</i> (MOURÃO <i>et al.</i> , 2012).)	27
4.5	Prensa eletrônica de bancada para ensaios de resistência de compressão a frio utilizada no CTF (Vale S.A).	28
4.6	Tambor utilizado em ensaios de Índice de Tamboramento (PASSOS, 2016)	28
4.7	Efeito da adição de CaO (MEYER, 1980).	29

4.8	Influência da adição de carbono na fase de magnetita em diferentes temperaturas (UMADEVI <i>et al.</i> , 2013).	30
4.9	Imagem de micrografia da região central das pelotas (MORBELLI, 2017).	30
4.10	Influência do teor de FeO nas propriedades de TI e CCS (UMADEVI <i>et al.</i> , 2013).	31
5.1	Amostras de concentrado de magnetita em tubos	35
5.2	Medição de indutância com Ponte LCR	36
5.3	Gráfico de linha ajustada para o experimento por auto-indutância	37
5.4	Teste com amostras de magnetita.	37
5.5	Gráfico de linha ajustada do experimento por indutância mútua.	39
5.6	Experimento com pelotas.	40
5.7	Grupos de pelotas.	40
6.1	Estrutura física do protótipo	43
6.2	Protótipo do medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro	44
6.3	Diagrama esquemático do protótipo do equipamento.	45
6.4	Compartimento de amostras preenchido com pelotas de minério de ferro.	46
6.5	Núcleo de aço silício.	47
6.6	Arduino MEGA (MCROBERTS, 2011).	47
6.7	Diagrama esquemático de um sistema DDS (SCHULER, 2013).	48
6.8	Configuração do filtro de Chebyshev.	49
6.9	Placa de circuito impresso do amplificador de potência.	49
6.10	Configuração <i>push-pull</i> (SEDRA e SMITH, 1998).	50
6.11	Diagrama esquemático do retificador.	50
6.12	Resultado do experimento para definição da frequência de operação.	52
7.1	Procedimentos de análises das amostras	54
7.2	Dispersão das leituras do protótipo	56
7.3	Gráfico de linha ajustada para as análises químicas de Fábrica	58
7.4	Gráfico de linha ajustada para as análises químicas de Brucutu	58
7.5	Dispersão das leituras do protótipo	59

Lista de Tabelas

5.1	Resultado das análises químicas de FeO para cada grupo de amostras . . .	34
5.2	Parâmetros construtivos da bobina	35
5.3	Valores de indutância medidos para diferentes massas de magnetita	36
5.4	Parâmetros construtivos das bobinas	38
5.5	Valores de tensão induzida	38
5.6	Resultados da análise de FeO	41
6.1	Características construtivas das bobinas	46
7.1	Resultados das análises químicas	54
7.2	Comparativo entre análise química e Satmagan	55
7.3	Respostas do protótipo para as amostras de pelotas	55
7.4	Leituras das quatro orientações do compartimento para cada amostra de pelotas	56
7.5	Resultados das análises químicas e respostas do protótipo	57
7.6	Resultados de Satmagan e respostas do protótipo	59

Lista de Abreviaturas e Siglas

A/D Analógico/Digital

AWG Escala Americana de Bitolas de Fios (*American Wire Gauge*)

CA Corrente Alternada

CCS Resistência de Compressão a frio (*Cold Crushing Strenght*)

CSN Companhia Siderúrgica Nacional

CTF Centro de Tecnologia de Ferrosos

D/A Digital/Analógico

DDS Síntese Digital Direta (*Digital Direct Synthesis*)

IDE Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment*)

IPM Índice de Permeabilidade Magnética

ISO Organização Internacional de Normalização (*International Standard Organization*)

PVC Policloreto de Polivinila (*Polyvinyl Chloride*)

PWM Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*)

SI Sistema Internacional de Unidades (*Système international d'unités*)

TI Índice de tamboramento (*Tumble Index*)

Lista de Símbolos

k fator de acoplamento magnético

B densidade de fluxo magnético

$^{\circ}C$ graus Celsius

CaO cálcio

C capacitância

cm centímetro

cm^3 centímetro cúbico

CO_2 dióxido de carbono

N_s número de espiras do secundário

Fe_2O_3 hematita

Fe_3O_4 magnetita

fem força eletromotriz

FeO Óxido de ferro (II) ou óxido ferroso

g grama

H campo magnético indutor

Hz hertz

kg quilograma

kHz quilo-hertz

L indutância

M magnetização

MgO magnésio

mH milihenry

mm milímetros

min minutos

Mt milhões de toneladas

mV milivolt

r coeficiente de correlação

R resistência

r^2 coeficiente de determinação

rpm rotações por minuto

e_s tensão induzida no secundário

μ permeabilidade magnética do núcleo da bobina

μ_0 permeabilidade magnética do do espaço livre

μH microhenry

W Watt

χ susceptibilidade magnética

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos	4
1.4	Questões da pesquisa	4
1.5	Escopo e limitações	4
1.6	Organização do texto	5
2	Fundamentação Teórica	6
2.1	Introdução	6
2.2	Conceitos de magnetismo	6
2.2.1	Campo magnético	6
2.2.2	Permeabilidade magnética	7
2.2.3	Susceptibilidade magnética	7
2.2.4	Propriedades magnéticas dos materiais	8
2.3	Características magnéticas das pelotas de minério de ferro	9
2.4	Indutância	10
2.5	Indutância mútua	10
3	Revisão Bibliográfica	12
3.1	Introdução	12
3.2	Análise Química	12
3.3	Espectrometria Mössbauer	13
3.4	Métodos de análise por propriedades magnéticas	14
3.4.1	Tubo de Davis	14
3.4.2	Satmagan	15
3.4.3	Equipamento desenvolvido pela pelletização da Vale	17
3.4.4	Medição por auto-indutância	18
3.4.5	Medição por transformador balanceado	19

3.4.6	Medição por transformador com núcleo de ar	20
3.5	Discussão	21
4	O processo de pelotização de minério de ferro	23
4.1	Introdução	23
4.2	Formação de pelotas cruas	24
4.3	Endurecimento	26
4.4	Propriedades físicas das pelotas de minério de ferro	26
4.5	Formação de magnetita em pelotas de minério de ferro	28
4.6	Influência da presença de magnetita em pelotas de minério de ferro	31
4.7	Discussão	31
5	Estudo de metodologias para medição de teor de magnetita	33
5.1	Introdução	33
5.2	Classificação de pelotas de minério de ferro com imã permanente	33
5.3	Análise de magnetita por auto-indutância	34
5.4	Análise de magnetita por indutância mútua	37
5.4.1	Experimento com concentrado de magnetita	37
5.4.2	Experimento com pelotas de minério de ferro	39
5.5	Discussão	41
6	Protótipo do Medidor de Magnetita em Pelotas de Minério de Ferro	42
6.1	Introdução	42
6.2	Princípio de funcionamento	42
6.3	Descrição do protótipo	43
6.3.1	Compartimento de amostras	45
6.3.2	Bobinas	45
6.3.3	Núcleo de aço silício	46
6.3.4	Microcontrolador	47
6.3.5	Gerador Senoidal	48
6.3.6	Amplificador	49
6.3.7	Retificador	50
6.3.8	Aquisição de dados	50
6.3.9	Processamento	51
6.4	Parâmetros de operação do protótipo	51
6.5	Discussão	52
7	Resultados e Discussões	53
7.1	Introdução	53
7.2	Amostras para calibração do protótipo	53

7.3	Avaliação das respostas do protótipo	55
7.4	Calibração do protótipo	57
7.4.1	Correlação com análises químicas	57
7.4.2	Correlação com Satmagan	59
7.5	Discussão	60
8	Conclusões	61
8.1	Recomendações de trabalhos futuros	63
	Referências Bibliográficas	64
A	Anexos	67
A.1	Publicações	67
A.2	Código fonte do algoritmo embarcado no microcontrolador	68

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

A pelletização é uma técnica de aglomeração de finos de minério de ferro na forma de pelotas. As pelotas de minério de ferro são o principal produto utilizado na alimentação de alto fornos e processos de redução direta para a produção de aço, pois são duráveis, de fácil manuseio e fornecem alta permeabilidade do leito e alta redutibilidade.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de minério de ferro e pelotas. Somente no ano de 2014 foram produzidas 441,8 *Mt* de minério de ferro e 54,7 *Mt* de pelotas. Os principais estados produtores são Minas Gerais (68,4%), Pará (29,2%) e Mato Grosso do Sul (1,2%). Apenas três empresas foram responsáveis por 84,5% da produção total em 2014: Vale SA, Samarco Mineração SA e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) (MORAES e RIBEIRO, 2018).

Após o processo de produção, as pelotas de minério de ferro precisam ser transportadas entre as unidades de pelletização e o cliente, onde estão localizadas as instalações de redução. Muitas das vezes, essas distâncias são grandes e as pelotas devem resistir à estocagem, ao manuseio e ao transporte. A resistência física das pelotas é medida pelo índice de tamboramento e resistência de compressão a frio. Pelotas pouco resistentes degradam-se e geram finos que prejudicam os processos de redução. Alguns autores como Dwarapudi e Rao (2007); Meyer (1980); Sá *et al.* (2004) descrevem como a presença de magnetita na composição mineralógica das pelotas causa uma diminuição na resistência física das mesmas.

Em uma das etapas do processo de pelletização, as pelotas de minério de ferro passam por um tratamento térmico para adquirirem resistência física. Nessa etapa, denominada de endurecimento, as pelotas são submetidas a elevadas temperaturas (aproximadamente 1300 °C) em fornos especiais. Porém, o ambiente de intensa temperatura do forno de pelletização propicia a formação de magnetita nas pelotas. Esse efeito é ainda mais acentuado caso a mistura para produção das pelotas possuam aditivos como o carvão. Em

geral, a magnetita é gerada no núcleo das pelotas, formando uma estrutura duplex. A estrutura duplex é caracterizada por conter magnetita no núcleo e hematita nas demais camadas externas. A capacidade da estrutura duplex de suportar esforços físicos é baixa (UMADEVI *et al.*, 2013).

A medição do teor de magnetita em amostras de pelotas de minério de ferro é uma atividade rotineira e realizada com grande frequência nas unidades de pelotização. Essa medição é importante porque fornece informações relevantes a respeito de parâmetros de processo e da qualidade das pelotas produzidas. Nos laboratórios das instalações de pelotização da Vale SA, o método de medição normalmente adotado é a análise química. Além dessa técnica, existem outros métodos disponíveis, como espectrometria Mössbauer, análise por microscopia óptica, tubo de Davis, entre outros. Porém, esses métodos são pouco explorados pela indústria de produção de pelotas por questões de custos e complexidade.

A análise química é realizada por titulação, com o uso de determinados reagentes químicos. Apesar da confiabilidade, esse método apresenta algumas características inadequadas às análises rotineiras realizadas em instalações de pelotização, como: procedimentos manuais sensíveis a erros humanos, utilização de reagentes químicos prejudiciais a laboratoristas e ao meio ambiente, elevado tempo e análise e a necessidade de pulverização e homogeneização das amostras de pelotas. Existem também algumas causas de erros associados aos resultados da análise química. Segundo Shandley e Bacon (1966), a maior causa de erros na análise química é a presença de outras fontes de FeO na amostra que não sejam de magnetita. Uma outra fonte de erro mais sutil é a contaminação com ferro metálico em amostras pulverizadas nos moinhos de bola.

O elevado tempo dispendido pela análise química dificulta o controle de variáveis de processo para reduzir a formação de magnetita em pelotas de minério de ferro. Como o tempo da análise química pode demorar horas em alguns casos, torna-se impraticável atuar na temperatura do forno em tempo hábil para tornar o processo mais eficiente e produzir pelotas de melhor qualidade.

Com o objetivo de obter uma solução de análise rápida, em tempo inferior às análises químicas e aos outros métodos disponíveis, nesta dissertação é proposto o desenvolvimento do protótipo de um medidor de teor de magnetita para pelotas de minério de ferro. O equipamento aproveita das propriedades magnéticas das pelotas para estimar o teor de magnetita e realiza análises não-destrutivas. O procedimento de análise consiste em preencher um compartimento com amostras de pelotas e inseri-lo no equipamento, sendo o resultado obtido em poucos segundos. O protótipo proposto é capaz de reproduzir os resultados de um equipamento comercial, denominado de Satmagan, com um coeficiente de determinação (r^2) de 81,6%. O Satmagan também utiliza de propriedades magnéticas para as medições, porém as amostras devem ser previamente pulverizadas. No caso do protótipo proposto, as medições são realizadas de maneira não-destrutiva e com procedi-

mentos mais simples.

A análise em tempo hábil permite atuar nas variáveis de processo, como temperatura e adição de aditivos. Como os queimadores dos fornos utilizam combustível fóssil, um controle mais eficiente da temperatura pode ser capaz de fornecer economia de combustível e aumentar a resistência física das pelotas produzidas. De acordo com Mourão (2017), a energia térmica consumida nos fornos corresponde a uma parcela apreciável dos custos do processo de pelotização.

1.2 Motivação

Os procedimentos para medição do teor de magnetita em pelotas de minério de ferro nas instalações de pelotização da Vale SA são realizadas por análise química. Nesse método, as amostras de pelotas são primeiramente pulverizadas e homogeneizadas. Então, é retirada uma alíquota do material para a realização da análise. O tempo de preparo da amostra, somado ao tempo necessário para análise, torna o procedimento demorado. Em uma rotina de laboratório, em que são realizadas diversas outras análises, os resultados de teores de magnetita podem demorar cerca de 6 horas. Esse requisito de tempo do método químico dificulta tomar decisões que permitam a realização de modificações no processo para otimizar a etapa de queima e adição de insumos. Além do mais, as análises envolvem custos dos reagentes químicos, a necessidade de um técnico químico qualificado, a exposição de pessoas a produtos químicos e a geração de resíduos tóxicos. Também, a metodologia utilizada dificulta a criação de algum sistema para análise de forma automática.

Com base no exposto, há uma demanda pelo desenvolvimento de uma solução de análise com procedimentos simples e resultados rápidos, preferencialmente com uma análise não-destrutiva das amostras. Porém, no presente momento, não foi encontrado nenhuma solução comercial que atenda esses requisitos.

O desenvolvimento de um dispositivo e uma metodologia para a determinação rápida do teor de magnetita nas pelotas permite a redução do tempo gasto em laboratório em relação a análise química convencional. Também, permite a criação de sistemas de controle eficientes para a temperatura de queima e adição de insumos. Dessa forma, é possível aumentar a eficiência da etapa de endurecimento, reduzir o consumo térmico no forno, reduzir a utilização de aditivos e aumentar a qualidade física das pelotas.

1.3 Objetivos

Nesta seção são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos da proposta de desenvolvimento do protótipo de um medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro.

1.3.1 Geral

Desenvolver um protótipo de um medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro e avaliar o desempenho em relação a outros métodos (análise química e o equipamento Satmagan).

1.3.2 Específicos

Este item apresenta os objetivos específicos desta pesquisa, descritos a seguir:

- Estudar as propriedades magnéticas do mineral magnetita;
- Estudar as propriedades magnéticas das pelotas de minério de ferro;
- Estudar metodologias para medir o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro de forma não-destrutiva, com base em propriedades magnéticas;
- Construir o protótipo do medidor;
- Projetar circuito eletrônico e desenvolver firmware;
- Correlacionar as respostas do instrumento com análises de laboratório.

1.4 Questões da pesquisa

Este item apresenta a formulação de algumas questões que motivaram o desenvolvimento do projeto e que surgiram ao longo da pesquisa.

- Existe correlação entre o teor de magnetita e as propriedades magnéticas das pelotas de minério de ferro ?
- Quais métodos podem ser usados para medir o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro por meio de propriedades magnéticas ?
- É possível medir o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro a partir de propriedades magnéticas e de modo não destrutivo ?

1.5 Escopo e limitações

O escopo desta pesquisa limitou-se ao desenvolvimento de um protótipo do medidor de teor de magnetita de pelotas de minério de ferro. Portanto, não foi construído uma versão final do equipamento. Além do disso, a pesquisa teve algumas limitações, descritas abaixo:

- A calibração do protótipo foi realizada com um número limitado de amostras de pelotas de minério de ferro. No total, foram utilizadas 10 amostras para calibração.
- Na calibração foram utilizadas amostras com pelotas de tamanhos relativamente uniformes. Logo, não foram considerados a influência do tamanho das pelotas nas medições.

1.6 Organização do texto

O texto da dissertação está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 é apresentado uma breve fundamentação teórica dos conceitos de magnetismo necessários à compreensão do princípio de funcionamento do protótipo proposto. No Capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica dos métodos e equipamentos utilizados para medir o teor de magnetita em minérios de ferro naturais, concentrados ou na forma de pelotas. No Capítulo 4 é descrito o processo de pelletização de minério de ferro. No Capítulo 5 é realizado um estudo de duas metodologias para medir quantidade de magnetita em amostras utilizando propriedades magnéticas. O Capítulo 6 descreve o protótipo do medidor desenvolvido. No capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos com o protótipo. Por fim, o Capítulo 8 apresenta uma conclusão e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

O protótipo do medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro explora as propriedades magnéticas das pelotas de minério de ferro nas medições. Neste capítulo são descritos alguns conceitos de magnetismo fundamentais para a compreensão das propriedades magnéticas das pelotas e o princípio de funcionamento do protótipo.

2.2 Conceitos de magnetismo

2.2.1 Campo magnético

O campo magnético é uma região do espaço em torno de um ímã, de uma corrente elétrica ou um campo elétrico variável, em que forças magnéticas são observadas. No entorno de um ímã permanente ou um fio que circula uma corrente contínua, o campo magnético é estacionário e denominado de campo magnetoestático. Ao redor de um fio que circula uma corrente alternada ou corrente contínua flutuante, o campo magnético varia continuamente de sentido e magnitude.

O campo magnético pode ser matematicamente descrito por dois vetores distintos, um denominado de densidade de fluxo magnético (B) e o outro de campo magnético indutor (H). O campo magnético indutor (H) refere-se ao campo magnético produzido pelo fluxo de corrente em fios ou bobinas e independe das propriedades magnéticas dos materiais do meio. A densidade de fluxo magnético (B) é o campo magnético total, considerando a contribuição das propriedades magnéticas do material do meio (BRITANNICA, 2018). No Sistema Internacional de Unidades (SI), H é descrito em A/m e B em Tesla (T).

2.2.2 Permeabilidade magnética

De acordo com Boylestad (2012), a permeabilidade magnética de um dado material é a medida da facilidade com que linhas de fluxo magnético podem ser estabelecidas nesse material. A permeabilidade magnética (μ) relaciona-se com os vetores B e H de acordo com a seguinte equação:

$$B = \mu H. \quad (2.1)$$

Em que:

- B = densidade de fluxo magnético [T];
- μ = permeabilidade magnética do meio [H/m];
- H = campo magnético indutor [A/m];

Conforme descrito em 2.1, uma bobina percorrida por uma corrente produz um determinado campo magnético (H). Se a permeabilidade magnética (μ) do meio for alterada, a densidade de fluxo magnético (B) também varia nessa mesma bobina.

Materiais de elevada permeabilidade magnética possuem a capacidade de concentrar linhas de fluxo magnético. Como pode ser observado na Figura 2.1, um material não magnético como o vidro, colocado nas proximidades de um imã, praticamente não causa alterações nas linhas de fluxo magnético. Entretanto, em material de elevada permeabilidade magnética próximo de um imã, como o ferro doce, as linhas de campo fluem preferencialmente pelo material ao invés de fluírem pelo ar. Esse fenômeno ocorre porque a permeabilidade magnética do ferro doce é superior à permeabilidade magnética do ar (BOYLESTAD, 2012).

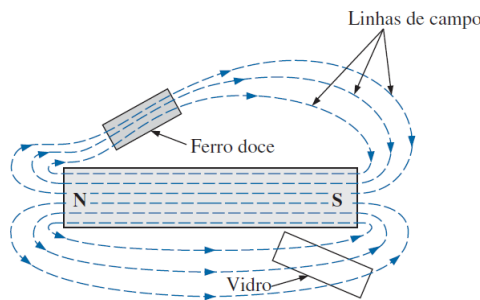


Figura 2.1: Efeito de um material de elevada permeabilidade magnética sobre as linha de campo de um ímã permanente (BOYLESTAD, 2012).

2.2.3 Susceptibilidade magnética

Segundo Lowrie (2007), a susceptibilidade magnética mensura a capacidade de magnetização de um dado material na presença de um campo magnético externo. A susceptibi-

lidade magnética χ relaciona-se com os vetores M e H segundo a seguinte equação:

$$M = \chi H. \quad (2.2)$$

Em que:

- M = magnetização [A/m];
- χ = susceptibilidade magnética [adimensional];
- H = campo magnético indutor [A/m].

Como os vetores M e H possuem as mesmas unidades, a susceptibilidade χ é adimensional. Segundo Halliday *et al.* (2008), a susceptibilidade magnética relaciona-se com a permeabilidade magnética de acordo com a seguinte equação:

$$\mu = \mu_0(\chi + 1). \quad (2.3)$$

Em que:

- μ_0 = permeabilidade magnética do espaço livre [H/m].

2.2.4 Propriedades magnéticas dos materiais

O comportamento magnético dos materiais pode ser dividido em três classes principais em termos da susceptibilidade magnética: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo (LOWRIE, 2007).

Os materiais diamagnéticos possuem uma baixa susceptibilidade magnética negativa e, quando expostos a um campo magnético, adquirem uma magnetização oposta a esse campo. O diamagnetismo inclui minerais que não possuem ferro, como quartzo e carbonato de cálcio, além de outras substâncias não minerais como matéria orgânica e água (DEARING, 1994; LOWRIE, 2007).

Os materiais diamagnéticos possuem uma baixa susceptibilidade magnética positiva. Quando expostos a um campo magnético, os materiais diamagnéticos adquirem uma fraca magnetização no mesmo sentido do campo. O diamagnetismo ocorre normalmente em minerais que possuem ferro, sendo muito comum em solos e rochas, como por exemplo, biotita e pirita (DEARING, 1994; LOWRIE, 2007).

O comportamento ferromagnético pode ser dividido em subcategorias: o próprio ferromagnetismo, o ferrimagnetismo, o antiferromagnetismo e o antiferromagnetismo inclinado. O ferromagnetismo compreende as substâncias altamente magnéticas. Os momentos magnéticos são altamente ordenados e alinhados na mesma direção. Os materiais ferromagnéticos possuem uma elevada susceptibilidade magnética, mas normalmente não

são encontrados de forma natural no ambiente. Alguns metais como ferro puro, níquel e cobalto são exemplos de materiais ferromagnéticos.

O ferrimagnetismo é a classe mais importante dos minerais encontrados na natureza. Os materiais ferrimagnéticos possuem momentos magnéticos fortemente alinhados, porém em conjuntos opostos e desiguais. Materiais dessa classe possuem uma alta susceptibilidade magnética, porém inferior aos materiais ferromagnéticos. A magnetita (Fe_3O_4) é o mais importante representante dos minerais ferrimagnéticos, que também compreendem minerais como maghemita, pirrotita e goethita. Os materiais ferrimagnéticos, também chamados de ferritas, apresentam histerese magnética e conservam magnetismo remanescente quando removidos de um campo magnetizante (DEARING, 1994; LOWRIE, 2007).

Materiais antiferromagnéticos possuem momentos magnéticos antiparalelos. Como resultado possuem uma fraca susceptibilidade magnética positiva. Não apresentam magnetização remanescente. Um exemplo comum de mineral antiferromagnético é a ilmenita ($FeTiO_3$) (LOWRIE, 2007).

Na classe antiferromagnética inclinada, os momentos magnéticos são antiparalelos, porém ligeiramente inclinados. Os materiais dessa classe, como por exemplo a hematita (Fe_2O_3), possuem uma fraca susceptibilidade magnética positiva. Na Figura 2.2 está representada o alinhamento dos momentos magnéticos dos materiais ferromagnéticos, antiferromagnéticos, antiferromagnéticos inclinados e ferrimagnéticos.

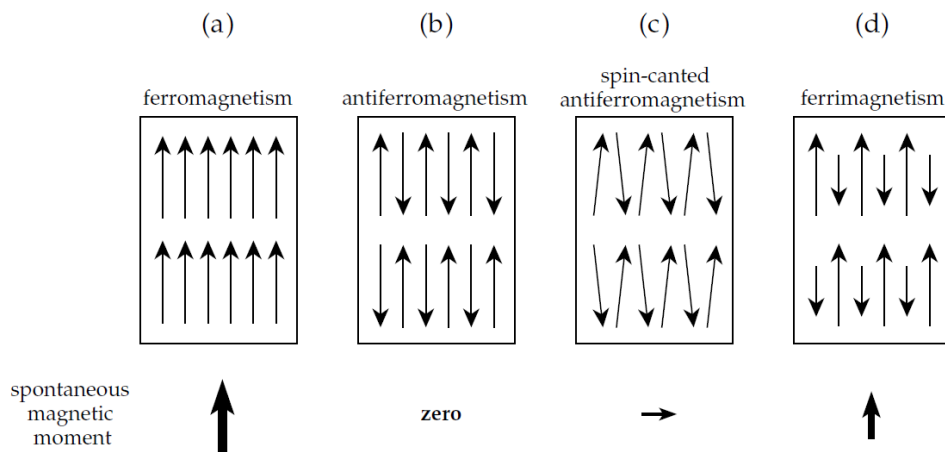


Figura 2.2: Representação esquemática do alinhamento dos momentos magnéticos (LOWRIE, 2007).

2.3 Características magnéticas das pelotas de minério de ferro

A composição mineralógica das pelotas de minério de ferro queimadas é formada principalmente pelo mineral hematita. A hematita é um óxido de ferro de fórmula química Fe_2O_3 ,

sendo o estágio final de oxidação do ferro. Ela apresenta um comportamento magnético antiferromagnético inclinado e, portanto, uma baixa permeabilidade magnética.

A fração de magnetita presente nas pelotas é formada durante a etapa térmica de endurecimento, em altas temperaturas, por processos químicos que convertem parte da hematita em magnetita, conforme será detalhado na subseção 4.5. A magnetita é um óxido de ferro de fórmula química Fe_3O_4 , formada pelos óxidos de ferro II e III ($FeO.Fe_2O_3$). É o principal representante dos materiais ferrimagnéticos. Os materiais dessa classe possuem uma elevada permeabilidade magnética e apresentam magnetismo espontâneo, mesmo na ausência de um campo magnético externo.

Segundo Dearing (1994), a magnetita domina as medidas de permeabilidade magnética quando presente em solos e rochas. Portanto, a permeabilidade magnética das pelotas de minério de ferro é derivada principalmente da presença de magnetita na composição. Ou seja, quanto maior o teor de magnetita contido nas pelotas, maior a permeabilidade magnética.

2.4 Indutância

A indutância, ou auto-indutância, é uma medida da capacidade de um indutor (ou bobina) de se opor a uma variação de corrente. O símbolo para a indutância é L e a unidade de medida é o henry (H). Um henry é a indutância requerida para induzir uma tensão de um volt através de um indutor devido a uma variação na corrente de um ampere por segundo (BOYLESTAD, 2012). Esta equação fornece uma aproximação para o valor de indutância de uma bobina:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}. \quad (2.4)$$

Em que:

- L = indutância [H];
- μ = permeabilidade magnética do núcleo da bobina [H/m];
- N = número de espiras [adimensional] ;
- A = área das espiras da bobina [m^2];
- l = comprimento longitudinal da bobina [m].

2.5 Indutância mútua

A indutância mútua é um fenômeno que envolve a interação entre duas bobinas. Se duas bobinas estão suficientemente próximas, e uma corrente percorre uma das bobinas, é ge-

rado um fluxo magnético que se enlaça com a outra. Se a corrente na primeira bobina varia no tempo, uma força eletromotriz é induzida na segunda bobina. A indutância mútua é o fenômeno físico que rege o funcionamento dos transformadores elétricos (HALLIDAY *et al.*, 2008).

Nos transformadores, a bobina percorrida pela corrente é denominada de primário, e a outra bobina é denominada por secundário. O princípio de funcionamento de um transformador é ilustrado no diagrama da Figura 2.3.

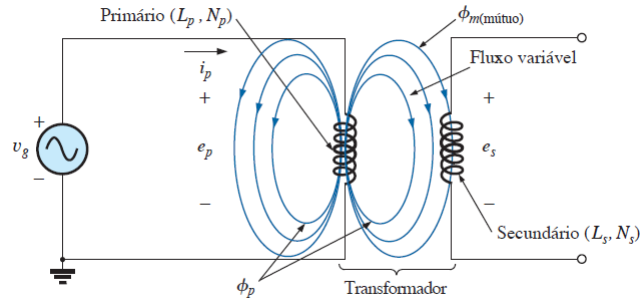


Figura 2.3: Diagrama esquemático de um transformador elétrico (BOYLESTAD, 2012).

De acordo com Boylestad (2012), o módulo da tensão induzida no secundário (e_s) é dada por:

$$e_s = k N_s \frac{d\phi_p}{dt}. \quad (2.5)$$

Em que:

- e_s = tensão induzida no secundário [V];
- k = fator de acoplamento magnético [adimensional];
- N_s = número de espiras do secundário [adimensional];
- ϕ_p = fluxo magnético produzido pelo primário [Wb].

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3.1 Introdução

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica de alguns dos métodos e equipamentos utilizados em laboratórios para medição do teor de magnetita em amostras de minério de ferro. Também são descritas algumas propostas disponíveis na literatura e em documentos de patentes para medição de teor baseadas em propriedades magnéticas das amostras. Todos os métodos e equipamentos descritos são utilizados na medição do teor de magnetita em amostras de minério de ferro na forma natural ou concentrado. Apenas o método de medição por auto-indutância e um equipamento desenvolvido pela Vale, que serão abordados respectivamente nas seções 3.4.4 e 3.4.3, foram desenvolvidos para aplicação com pelotas de minério de ferro.

3.2 Análise Química

Segundo Costa *et al.* (2002), a análise química é o método mais confiável para medir o teor de magnetita em amostras de minério de ferro. Para proceder com as medições, deve-se assumir que não existe outra fonte de FeO que não seja a magnetita. Então, o cálculo do teor de magnetita da amostra é obtido diretamente pela equação:

$$Magnetita(\%) = 3,222 \times FeO(\%). \quad (3.1)$$

Os procedimentos da análise química de teor de FeO são padronizados de acordo com a ISO 9035 (Determinação do teor de ferro (II) solúvel em ácido - Método volumétrico). Conforme descrito pela norma, a análise química é realizada pela técnica de titulação (ou volumetria). Segundo Hillerich e Peters (2018) a titulação é uma das técnicas mais antigas utilizadas em química para conhecer a concentração de determinadas substâncias de interesse (analito). O procedimento consiste em adicionar gradativamente uma solução padrão de concentração conhecida (titulante) a uma outra solução de volume conhecido

e concentração desconhecida, com o auxílio de uma bureta. A adição de titulante é interrompida quando o ponto de equivalência é atingido, que normalmente é acompanhado por uma mudança de cor pela adição de um indicador. A concentração do analito é determinada a partir da quantidade de reagente gasto. Os aparatos utilizados na titulometria estão ilustrados na Figura 3.1.



Figura 3.1: Aparato utilizado em titulometria (FOGAÇA, 2018)

Como a análise química utiliza a técnica de titulação para medir o teor de magnetita em minérios de ferro naturais ou na forma de pelotas, são necessários laboristas especializados para manusear os aparatos e realizar os procedimentos de análise. Também, vale ressaltar que os reagentes químicos utilizados são nocivos às pessoas em contato com as substâncias e ao meio ambiente.

3.3 Espectrometria Mössbauer

A espectrometria Mössbauer é uma técnica que permite identificar e quantificar óxidos de ferro, como por exemplo, a magnetita. A técnica baseia-se no efeito Mössbauer, que envolve a absorção ressonante de radiação gama. O espectrômetro Mössbauer consiste basicamente de uma fonte de raios gama, a amostra (também chamada de absorvedor) e um detector (PIRES, 2014). O desenho esquemático do espectrômetro Mössbauer é apresentado na Figura 3.2.

Para as análises com o espectrômetro Mössbauer, as amostras de minério ou pelotas devem ser pulverizadas em uma pastilha. De acordo com Costa *et al.* (2002), a espectrometria Mössbauer demanda um elevado tempo de análise. É comum a necessidade de 5 a 12 horas para obter o espectro. Essa alta demanda de tempo desqualifica a técnica para procedimentos de análises de rotina. Devido ao uso de fonte radioativa, são necessárias autorizações especiais e técnicos especializados para o manuseio do equipamento. Um exemplo do espectrômetro Mössbauer é apresentado na Figura 3.3.

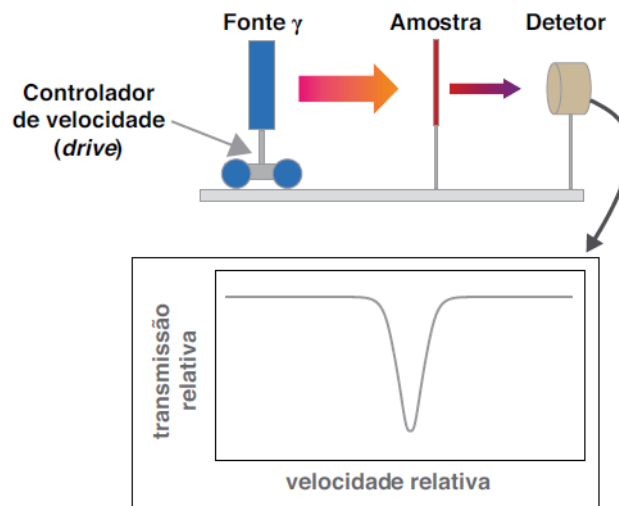


Figura 3.2: Desenho esquemático do princípio de funcionamento de um Espectrômetro Mössbauer (PIRES, 2014)

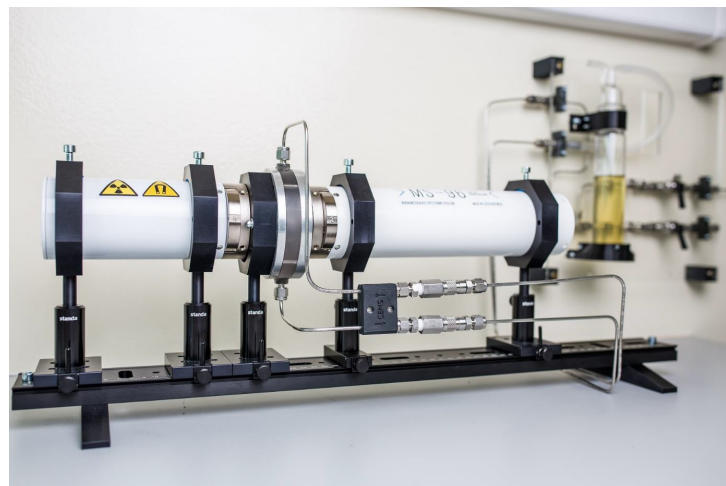


Figura 3.3: Espectrômetro Mössbauer (NAVAŘÍK, 2018)

3.4 Métodos de análise por propriedades magnéticas

A magnetita é um mineral que apresenta elevadas propriedades magnéticas. Portanto, existem equipamentos e alguns métodos propostos na literatura para medir o teor de magnetita em minério de ferro natural, concentrado e na forma de pelotas com base nessas propriedades.

3.4.1 Tubo de Davis

O tubo de Davis é um equipamento comercial utilizado em laboratório para medir o teor de magnetita em amostras de minério de ferro. O equipamento consiste basicamente em um tubo de vidro inclinado posicionado entre os polos de um eletroímã.

As amostras de minério previamente preparadas são despejadas no interior do tubo,

que oscila enquanto uma água de lavagem flui pelo seu interior. As partículas magnéticas (magnetita) são coletadas dentro do tubo na zona de intenso magnetismo e todos os minerais não magnéticos são lavados (SCHULZ, 1964). A Figura 3.4 é uma imagem ilustrativa do equipamento.



Figura 3.4: Imagem do equipamento Tubo de Davis (SEPOR, 2018).

A eficiência das medições do método por tubo de Davis depende do grau de liberação dos minerais obtidas na preparação das amostras, por moagem. Caso a fração do material não magnético presente na amostra não esteja totalmente liberada, ela será atraída pelo eletroímã juntamente com a magnetita e incluída na fração magnética (SHANDLEY e BACON, 1966).

O tubo de Davis não é uma solução originariamente pensada para análise de teor de magnetita em pelotas, sendo utilizado em minério de ferro na forma natural ou concentrado. Porém, o referido método pode ser utilizado em amostras de pelotas previamente pulverizadas e homogeneizadas. O tempo de análise necessário, desconsiderando etapas de preparação de amostra, é de aproximadamente 10 minutos.

3.4.2 Satmagan

O Satmagan (SATuration MAGnetization ANalyser) é um equipamento comercial utilizado em laboratório para análise da composição de magnetita em minério de ferro, concentrados e rejeitos. O princípio de funcionamento do Satmagan está baseado na medida do momento magnético da amostra. O dispositivo consiste em uma balança magnética, em que a amostra é pesada no campo gravitacional e também sob o efeito de um campo magnético forte o suficiente para saturar o material magnético da amostra. O momento magnético é obtido pela medida da força que atua na amostra sob o campo magnético não homogêneo (campo com gradiente horizontal) em comparação com a força gravitacional que atua na amostra. As amostras são submetidas a um campo magnético de aproximadamente 4000 Gauss ou 0,4 Tesla (SYSTEMS, 2013). O Satmagan é mostrado na Figura 3.5.

O Satmagan utiliza amostras de minério pulverizadas ou granulares. A célula de amostra, mostrada na Figura 3.6, possui um volume de $1,2 \text{ cm}^3$. O equipamento apresenta



Figura 3.5: Equipamento Satmagan (SYSTEMS, 2013)

algumas exigências em relação à granulometria das amostras. Para amostras muito finas, menores que $150\ \mu m$, o equipamento pode apresentar leituras ligeiramente menores, necessitando de uma curva de calibração diferente. Grãos muito grandes, maiores que $0,3\ mm$, não apresentam bons resultados, pois a estrutura geométrica é diferente entre duas amostras distintas. O tempo de análise do equipamento, desconsiderando a preparação das amostras, é de aproximadamente um minuto. O erro máximo de leitura é de $0,4\%$ do fundo de escala (SYSTEMS, 2013).



Figura 3.6: Célula de amostra (SYSTEMS, 2013)

O procedimento de análise pelo equipamento é realizado de forma manual, conforme as etapas descritas abaixo:

1. Escolher uma faixa de medição (10x ou 20x);
2. Preencher a célula de amostra com o material em granulometria adequada e inserir no porta amostras do equipamento;
3. Calibrar a escala girando o potenciômetro da balança gravitacional;
4. Girar a manivela do imã para cima;
5. Calibrar a escala girando o potenciômetro da balança magnética;
6. Anotar as medidas das escalas dos potenciômetros;
7. Girar a manivela para baixo antes de retirar a amostra;
8. Utilizar a curva de calibração para definir a concentração de material magnético.

O Satmagan é um equipamento analógico e não possui nenhum tipo de interface de comunicação externa. Portanto, as informações das análises devem ser anotadas manualmente. Essa característica limita a criação de bancos de dados e históricos de forma automática, e também dificulta a interação do equipamento com outros sistemas de informação dos laboratórios. O preço de mercado para aquisição do Satmagan cotado em 2018 foi de R\$ 240.000,00.

3.4.3 Equipamento desenvolvido pela pelletização da Vale

Nesta seção é descrito um equipamento desenvolvido por Souza (2006), para avaliar a composição de magnetita em pelotas de minério de ferro. O equipamento proposto consiste basicamente de um circuito oscilador RLC, em que as pelotas de minério de ferro a serem analisadas são inseridas no núcleo da bobina. Quando a pelota está no interior da bobina do oscilador, ocorre uma variação da frequência de oscilação devido a mudança de indutância causada pela presença de um material magnético no núcleo da bobina. Um diagrama esquemático do dispositivo é apresentado na Figura 3.7.

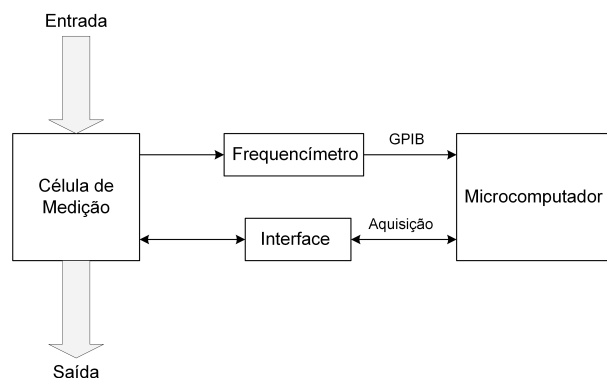


Figura 3.7: Desenho esquemático do equipamento desenvolvido pela pelletização da Vale

As pelotas são alimentadas individualmente por um funil na parte superior do equipamento. Então, é realizada a leitura da variação de frequência de oscilação para cada pelota. O equipamento possui um software de interface com o usuário que permite a análise dos dados obtidos pelas medições nas pelotas. O equipamento é mostrado na Figura 3.8.

De acordo com o autor, existe uma dispersão das medidas entre as pelotas de uma mesma amostragem. Essa dispersão é justificada pela diferença de queima entre as pelotas, variações no tamanho e pela inhomogeneidade na mistura do minério de ferro com outros componentes, como cavão e calcário, na produção das pelotas. Por análises estatísticas, concluiu-se que uma amostragem estatisticamente significativa deve ser considerada a partir de 300 pelotas.

Medições realizadas por espectrometria Mössbauer mostraram que pelotas com sinais em torno de 10kHz possuem 90,6% de hematita e nenhuma magnetita. Por outro lado, as

pelotas com sinais maiores, em torno de 800kHz, possuem 86% de magnetita e 14% de hematita. O protótipo não mede o teor de magnetita nas pelotas, mas é capaz de identificar tendência de aumento ou diminuição do teor de magnetita nas pelotas produzidas.



Figura 3.8: Fotografia do equipamento desenvolvido pela pelotização da Vale

3.4.4 Medição por auto-indutância

Os autores Simões *et al.* (2014) propuseram uma metodologia de análise do teor de magnetita em pelotas de minério de ferro a partir de propriedades magnéticas. O método proposto consiste em medir o teor de magnetita com base na variação da indutância de uma bobina, provocada pela inserção de uma pelota em seu núcleo. A variação da indutância na bobina está associada a permeabilidade magnética das pelotas. O procedimento de medida utiliza uma bobina com núcleo de ar e uma ponte LCR para medir a indutância da bobina. As pelotas são analisadas individualmente, ou seja, uma pelota por vez. Os instrumentos utilizados e a configuração dos procedimentos para as medições estão ilustrados na Figura 3.9.



Figura 3.9: Ponte LCR e bobina com núcleo de ar (SIMÕES *et al.*, 2014)

Por meio de experimentos, os autores constataram que a presença de trincas nas pelotas prejudicam a correlação entre as medidas de indutância e o teor de FeO das pelotas. A justificativa apresentada é que as trincas alteram a densidade das pelotas

e afetam as medições, de forma que a medida que o tamanho das trincas se elevam, o valor de indutância medida na bobina diminui. Para contornar o problema das trincas, as pelotas são previamente pulverizadas e comprimidas em um compartimento de 1cm^3 para, então, serem inseridas no núcleo da bobina. Com essa nova abordagem foi obtida uma correlação de 0,968 entre a indutância medida e o teor de FeO das pelotas obtido por química analítica clássica. Também foi definida uma equação matemática que estima o teor de FeO das pelotas diretamente do valor de indutância medido na bobina. O valor da indutância medida é definida pelo autor como Índice de Permeabilidade Magnética (IPM). O gráfico de correlação obtido é apresentada na Figura 3.10.

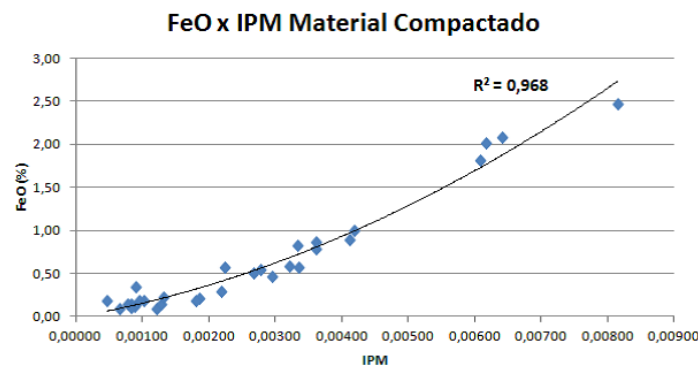


Figura 3.10: Gráfico de correlação (SIMÕES *et al.*, 2014)

3.4.5 Medição por transformador balanceado

Os autores Shandley e Bacon (1966) propõem um instrumento para medir o teor de magnetita em minérios de ferro naturais, provenientes do processo de lavra. Apesar da proposta não ser direcionada para a análise em pelotas, parte-se do pressuposto que a metodologia adotada, com as devidas adaptações, pode ser utilizada também na análise de pelotas previamente pulverizadas. Denominado por medidor de susceptibilidade, o instrumento funciona com base no princípio de transformador balanceado. Como pode ser observado na Figura 3.11, o primário é uma bobina comum e as bobinas do secundário são ligadas em oposição, de tal forma que quando o compartimento de amostras está vazio a tensão de saída é nula. As amostras moídas são preenchidas em um recipiente e inseridas simetricamente em uma das bobinas secundárias, causando um desbalanço na tensão de saída. A tensão de saída é amplificada, retificada e medida por um microamperímetro.

O procedimento para medição do teor de magnetita consiste em inserir um recipiente contendo 25 cm^3 de amostra desconhecida no equipamento e determinar a quantidade de “magnetita equivalente” por 100 cm^3 a partir da leitura do medidor e de uma curva de correção, apresentada na Figura 3.12. Então, a amostra é pesada e a densidade para 25 cm^3 é calculada. A porcentagem de magnetita em peso é a relação da quantidade de gramas de magnetita por 100 cm^3 dividido pela densidade.

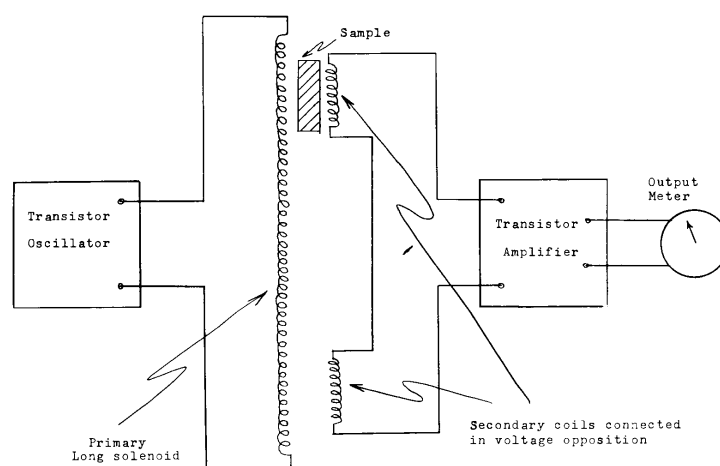


Figura 3.11: Diagrama do medidor de susceptibilidade (SHANDLEY e BACON, 1966)

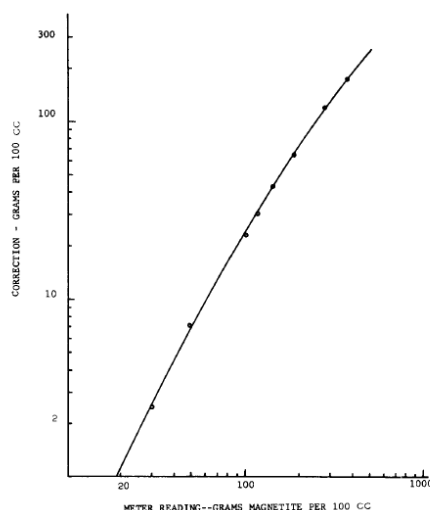


Figura 3.12: Curva de correção para medição (SHANDLEY e BACON, 1966)

3.4.6 Medição por transformador com núcleo de ar

Outra proposta de medida de teor de magnetita em minério de ferro natural é descrita por Walter (1972). O autor propõe um dispositivo baseado em um transformador com núcleo de ar, adaptado para receber amostras de minério de ferro. As amostras são preenchidas em um tubo plástico dimensionado para ser inserido no interior do núcleo. Um requisito para medição é que as amostras sejam pulverizadas e estejam secas. O dispositivo possui um enrolamento primário e um secundário montados em uma estrutura de material magneticamente inerte e vazada ao centro para receber a amostra a ser testada.

Mesmo na ausência de amostra no núcleo do transformador, existe um certo acoplamento magnético entre as bobinas que gera um sinal na saída do instrumento. Para compensar esse sinal, o equipamento possui um circuito com potenciômetro para o ajuste de zero. Um desenho esquemático do equipamento é apresentado na Figura 3.13.

A Figura 3.13A é uma visão frontal do equipamento. As amostras são inseridas pela

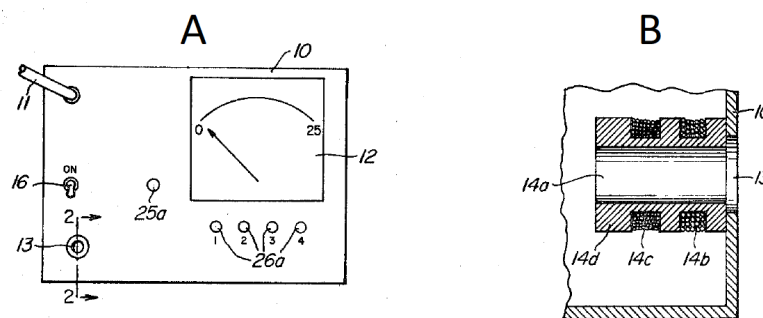


Figura 3.13: Medidor de susceptibilidade (WALTER, 1972)

abertura (13), que fornece acesso ao transformador de núcleo de ar. O resultado das medições são mostradas no leitor (12), localizado na parte frontal do instrumento. A Figura 3.13B é uma visão em corte do transformador de núcleo de ar. O transformador possui um enrolamento primário (14b) e um secundário (14c) montadas em um material magneticamente inerte (14d).

3.5 Discussão

Neste capítulo foram descritos alguns métodos e equipamentos utilizados para medir o teor de magnetita em minério de ferro natural, concentrado e na forma de pelotas. Cada um dos métodos abordados possuem características distintas em relação à custo de aquisição, custo por análise, procedimentos necessários à análise e tempo para obtenção de resultados.

Todos os métodos descritos, com exceção do método de auto-indutância (subseção 5.3) e do equipamento desenvolvido pela Vale (seção 3.4.3), foram elaborados para a análise em minério de ferro natural ou concentrado em granulometria fina. Nesse caso, para uma análise com pelotas, torna-se necessário pulverizar e homogenizar as amostras. Esse procedimento, além de trabalhoso, aumenta o tempo dispendido pelas análises. O método de auto-indutância, apesar de ser pensado para pelotas, também necessita de pulverização das amostras.

O tubo de Davis, o espectrômetro Mössbauer e o Satmagan são equipamentos de custo de aquisição elevados. Os métodos por análise química, tubo de Davis e Satmagan possuem muitos procedimentos manuais, o que favorece a inserção de erros humanos nas medições e dificulta a criação de alguma forma de automatismo para as análises.

Os métodos de medição por auto-indutância, transformador balanceado e o transformador com núcleo de ar, apesar de não serem soluções comerciais, possuem baixo custo, dado a simplicidades dos materiais utilizados. Possuem procedimentos simples, porém não foram projetos para a análise não-destrutiva em pelotas de minério de ferro.

No processo de pelotização, é interessante a opção por métodos e equipamentos que

forneçam resultados rápidos de análises, em tempo hábil para atuar nos sistemas de controle e minimizar a formação de magnetita nas pelotas. Portanto, há oportunidades para o desenvolvimento de uma solução de análises de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro de maneira não destrutiva, com procedimentos simples e resultados rápidos.

Capítulo 4

O processo de pelletização de minério de ferro

4.1 Introdução

A pelletização é uma técnica de aglomeração de finos de minério de ferro na forma de pelotas. Os finos de minério de ferro não são adequados como material de carga para alto fornos, porque fornecem uma baixa permeabilidade no leito. Portanto, os finos devem ser aglomerados em partículas maiores para aumentar a permeabilidade do leito do forno, aumentar a taxa de redução e diminuir a quantidade de material expelido pelo forno na forma de poeira. Existem basicamente quatro métodos de aglomeração de finos de minério: sinterização, nodulização, briquetagem e pelletização (EISELE e KAWATRA, 2003).

A pelletização é um processo amplamente utilizado, principalmente em casos que minério necessita ser transportados a grandes distâncias entre a mina e o alto forno, pois as pelotas são duráveis e de fácil manuseio. Além do mais, as pelotas possuem um alto desempenho nos fornos, fornecendo alta permeabilidade do leito e alta redutibilidade (EISELE e KAWATRA, 2003).

A produção de pelotas tem experimentado um grande crescimento ao redor do mundo nos últimos anos. Esse crescimento é explicado pelo empobrecimento das reservas de minério de ferro disponíveis. Os minérios pobres necessitam ser moídos e concentrados, o que gera um grande montante de finos que são adequados a pelletização (MOURÃO, 2017).

As pelotas de minério de ferro são utilizadas na alimentação de alto fornos e de processos de redução direta para a produção de aço. Segundo Meyer (1980), algumas das principais características das pelotas de minério de ferro são:

- Distribuição uniforme de tamanhos dentro de uma faixa (9mm a 15mm de diâmetro);
- Alta porosidade (25% a 30%);

- Teor de ferro superior a 63%;
- Alta resistência mecânica;
- Baixa tendência a abrasão e comportamento adequado durante o transporte.

O processo de pelletização é dividido em duas etapas principais, sendo: formação de pelotas cruas e endurecimento. O fluxograma do processo de pelletização é apresentado na Figura 4.1.

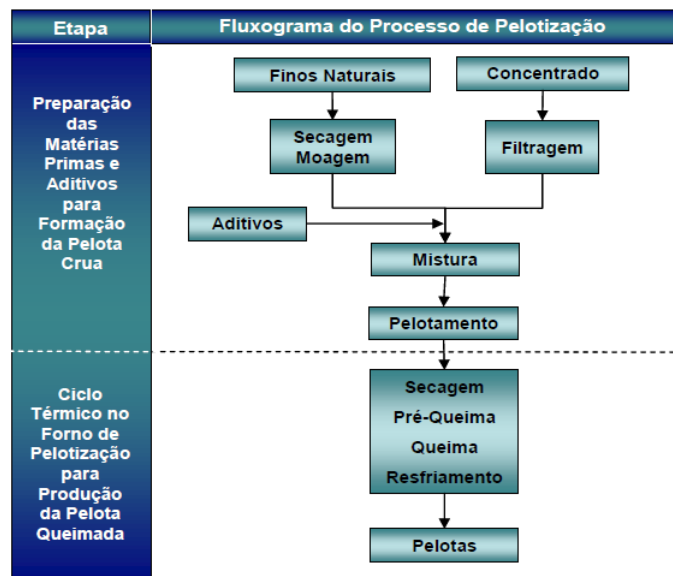


Figura 4.1: Fluxograma do processo de pelotização ((MARTIN) *apud* (COSTA, 2008)).

4.2 Formação de pelotas cruas

A formação de pelotas cruas é a primeira etapa do processo de produção de pelotas. Nessa etapa, partículas finas de minério de ferro são levemente umedecidas e misturadas com aditivos e aglomerantes. Essa mistura continuamente alimenta tambores ou discos de pelotamento para formar aglomerados esféricos, denominados de pelotas cruas. As pelotas cruas possuem resistência física suficiente para serem transportadas até a etapa de endurecimento. O mecanismo de formação de pelotas cruas é determinado por uma série de fenômenos que envolvem as partículas finas de minério e a água, conforme ilustrado na Figura 4.2 (MEYER, 1980).

Para atender as demandas de qualidade exigidas pelos fornos de produção de aço, aditivos devem ser misturados ao minério de ferro para produzir pelotas queimadas com características química desejadas. Os aditivos normalmente utilizados na produção de pelotas são: calcário, dolomita, carvão ou coke breeze e bentonita (SANDGREN *et al.*, 2004).

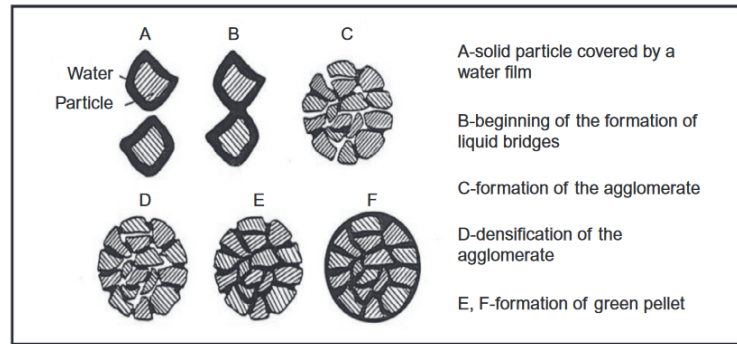


Figura 4.2: Etapas de formação de pelotas cruas (MEYER, 1980).

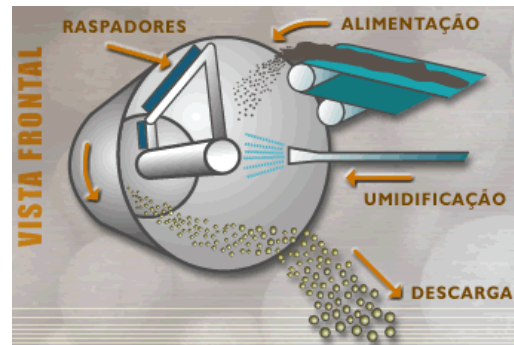
O carvão fornece energia térmica no processo de endurecimento das pelotas, resultando em uma diminuição do consumo de combustível pelo forno. Também favorece uma distribuição mais homogênea de calor no interior das pelotas, contribuindo na melhora da qualidade das pelotas produzidas e aumento da produtividade do processo. O calcário é uma fonte de cálcio (CaO) e magnésio (MgO), fundamentais para o endurecimento das pelotas, formando escória que fortalece a ligação entre os grãos. A utilização de calcário é importante para que as pelotas adquiram as características mecânicas e metalúrgicas necessárias. A bentonita é um tipo de aglomerante de origem inorgânica, que favorece a aglomeração de partículas e concede propriedades físicas as pelotas (PASSOS, 2016).

O disco de pelotamento é formado por um prato ou disco giratório inclinado com paredes periféricas, conforme Figura 4.3a. O disco é continuamente alimentado com a mistura de minério de ferro e aditivos para a formação de pelotas cruas. De acordo com Mourão (2017), os discos de pelotamento são os mais utilizados nos processos de pelotização, dado a maior simplicidade do equipamento.

O tambor de pelotamento consiste basicamente de um cilindro giratório inclinado com um pulverizador de água na extremidade. O material é alimentado no tambor para a formação de pelotas cruas (MORAES *et al.*, 2018). A Figura 4.3b ilustra uma representação esquemática de um tambor de pelotamento.



(a) Disco de pelotamento.



(b) Tambor de pelotamento.

Figura 4.3: Representações esquemáticas do disco de pelotamento e do tambor de pelotamento (INFOMET, 2018).

4.3 Endurecimento

Os processos de produção de aço requerem que as pelotas de minério de ferro possuam resistência mecânica adequada. As pelotas devem suportar atritos e quedas durante o transporte e o peso da carga dentro dos reatores. Com o intuito de conferir maior resistência mecânica, as pelotas cruas são submetidas a um tratamento térmico no processo de endurecimento (MORAES *et al.*, 2018).

O endurecimento ocorre em três fases: secagem, queima e resfriamento. Na fase de secagem, a água na forma de umidade é removida das pelotas. As pelotas possuem água no interior dos poros e capilares. As temperaturas máximas na fase de secagem são da ordem de 300 °C. Posteriormente a secagem, as pelotas são submetidas a fase de queima em temperaturas que podem chegar a 1300 °C. Nessa fase ocorre a torrefação de todos os componentes das pelotas, liberando a água quimicamente ligada e CO_2 . Também ocorre a sinterização dos grãos, que confere resistência física às pelotas. Por fim, as pelotas são resfriadas pelo contato com o ar ambiente (MORAES *et al.*, 2018).

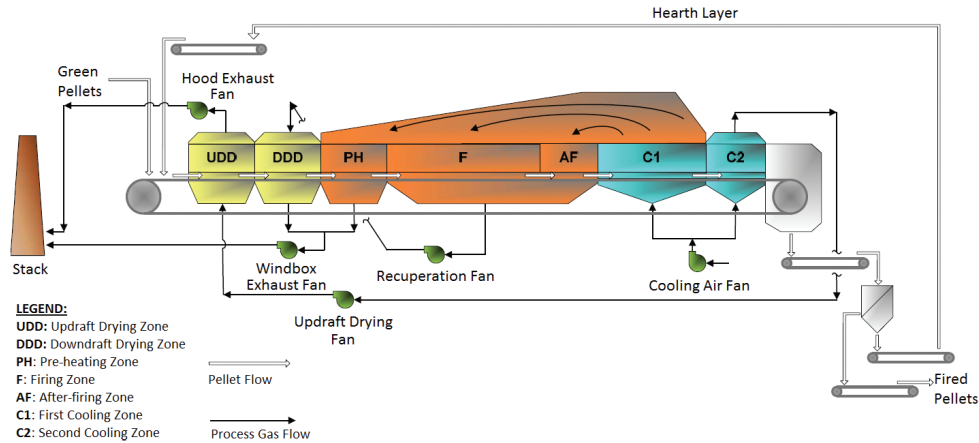
Após o processo de endurecimento, as pelotas são denominadas de pelotas queimadas. As duas tecnologias empregadas no processo de endurecimento de pelotas cruas são: forno de grelha móvel (*Straight Grate*) e sistema de grelha móvel – forno rotativo (*Grate Kiln*).

A tecnologia *Straight Grate* consiste basicamente de um único forno, dividido em zonas de secagem, pré-queima, queima e resfriamento de pelotas queimadas. A tecnologia *Grate Kiln* possui três unidades conectadas em série, sendo: uma grade móvel para secagem e pré-aquecimento de pelotas cruas, um forno rotativo para queima de pelotas e um resfriador para pelotas queimadas (ZHU *et al.*, 2015). O diagrama esquemático do fluxo de processos das tecnologias *Straight Grate* e *Grate Kiln* são apresentadas na Figura 4.4.

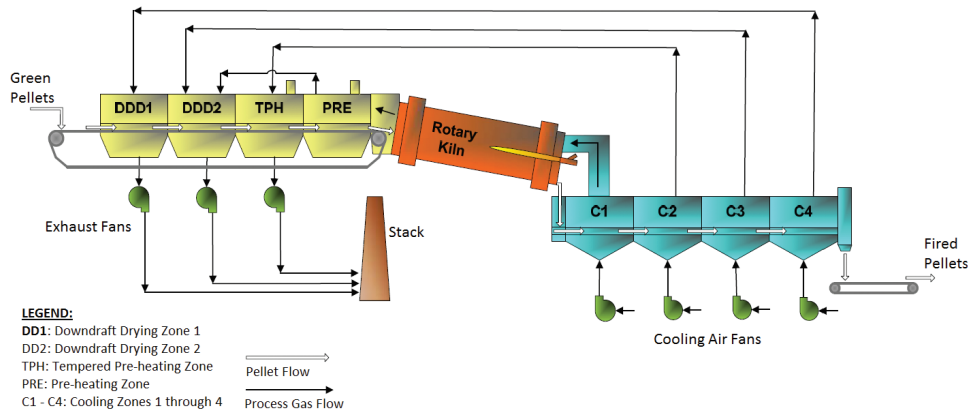
4.4 Propriedades físicas das pelotas de minério de ferro

As propriedades físicas das pelotas de minério de ferro fornecem uma indicação do comportamento das pelotas durante as etapas de manuseio e transporte. Nessas etapas, as pelotas podem sofrer degradação e gerar pequenas partículas, denominadas de “finos” (HALT, 2014). Os principais índices que medem as propriedades físicas das pelotas são o índice de tamboramento e resistência de compressão a frio.

A resistência de compressão a frio, ou em inglês *cold crushing strength* (CCS), permite avaliar a integridade física das pelotas durante os processos de estocagem e transporte. A metodologia para a determinação da resistência a compressão a frio é padronizada pela norma ISO 4700 (Determinação da resistência à compressão). A norma ISO 4700:2015 especifica que 100 pelotas devem ser submetidas individualmente a uma força de compressão uniaxial entre duas placas paralelas, a uma taxa específica de 10 a 20 mm/min.



(a) forno de grelha móvel (Straight Grate).



(b) sistema de grelha móvel – forno rotativo (Grate Kiln).

Figura 4.4: Desenho esquemático das tecnologias de endurecimento de pelotas ((MORAES *et al.*, 2018) *apud* (MOURÃO *et al.*, 2012).)

Cada pelota é prensada até o momento de ruptura, e a resistência de compressão é calculada como a média aritmética de todas as medidas obtidas. O resultado é expresso em decanewtons por pelota, com uma casa decimal (ILJANA, 2017). Uma prensa eletrônica típica utilizada em ensaios para medição de resistência de compressão a frio é mostrada na Figura 4.5.

O índice de tamboramento, ou em inglês *Tumble Index* (TI), é uma medida relativa da geração de finos pelas pelotas de minério de ferro durante as etapas de manuseio e transporte (PASSOS, 2016). A medição do índice de tamboramento é normatizada pela ISO 3271 (Determinação dos índices de tamboramento e abrasão). O procedimento descrito pela ISO 3271 consiste em alimentar um tambor de abrasão com 15 kg de amostra de pelotas com granulometria entre 6,3 mm e 19,0 mm e racioná-lo 200 vezes a uma velocidade de 25 rpm. O resultado do índice de tamboramento é o percentual de material retido em uma peneira de 6,3 mm (ILJANA, 2017). Na Figura 4.6 é apresentado um tambor utilizado nos ensaios de Índice de Tamboramento.



Figura 4.5: Prensa eletrônica de bancada para ensaios de resistência de compressão a frio utilizada no CTF (Vale S.A).



Figura 4.6: Tambor utilizado em ensaios de Índice de Tamboramento (PASSOS, 2016)

4.5 Formação de magnetita em pelotas de minério de ferro

As pelotas de minério de ferro podem ser produzidas a partir de diferentes tipos de minérios de ferro, como hematita, magnetita ou goethita. Entretanto, independentemente do tipo minério considerado, pelas altas temperaturas e o ambiente oxidante dos fornos de pelletização, a fase mineral das pelotas queimadas é a hematita (MOURÃO, 2017).

O autor Meyer (1980) descreve a formação de magnetita em pelotas por um processo

de dissociação térmica da hematita (Fe_2O_3). Segundo o autor, o equilíbrio da reação 4.1 tende para a direita até temperaturas próximas de $1400^\circ C$. Porém, à temperaturas mais elevadas, inicia-se a dissociação térmica da hematita. Então, o equilíbrio tende para a esquerda causando a formação de magnetita (Fe_3O_4).



Caso as pelotas contenham aditivos básicos, a dissociação térmica da hematita começa a temperaturas mais baixas. A influência da adição de CaO na formação de magnetita nas pelotas pode ser observada na Figura 4.7.

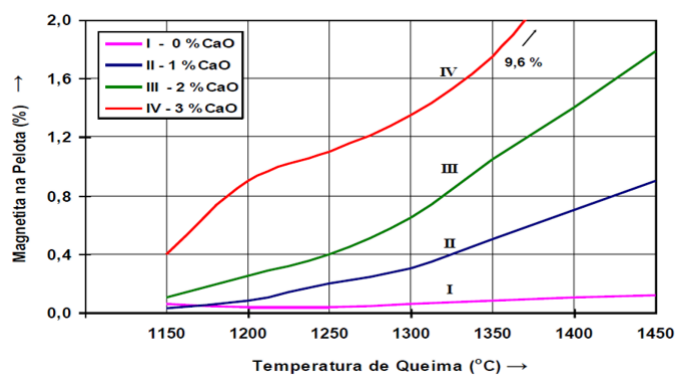


Figura 4.7: Efeito da adição de CaO (MEYER, 1980).

Sem a adição de CaO (Curva I), praticamente não ocorre formação de magnetita nas pelotas até a temperatura de $1400^\circ C$. Um aumento na quantidade de CaO adicionado as pelotas favorece a formação de magnetita (curvas II, III e IV).

Um outro mecanismo de formação de magnetita em pelotas é descrito por Umadevi *et al.* (2013). Segundo o autor, na etapa de endurecimento é gerado monóxido de carbono devido a queima incompleta do carvão. O monóxido de carbono é responsável pela redução da hematita em magnetita. Logo, forma-se uma estrutura duplex na pelota, contendo magnetita no núcleo e hematita nas camadas mais externas. A diferença de contração dessas fases minerais durante a etapa de resfriamento causam fissuras que enfraquecem a resistência das pelotas.

Estudos realizados por Umadevi *et al.* (2013) mostraram que a dosagem de coque também influencia na formação de magnetita em pelotas. Para o estudo, pelotas com diferentes dosagens de carvão foram produzidas em diferentes temperaturas de queima. O teor de magnetita das amostras de pelotas foram obtidos por análise quantitativa com microscopia ótica. A relação obtida entre teor de carbono nas pelotas cruas e a quantidade de magnetita presente nas pelotas queimadas é apresentada na Figura 4.8. Vale ressaltar que a quantidade de carbono nas pelotas cruas é diretamente proporcional a dosagem de coque adicionada. Como pode ser observado, o teor de magnetita torna-se maior à medida que são aumentadas as quantidades de carbono e a temperatura de queima.

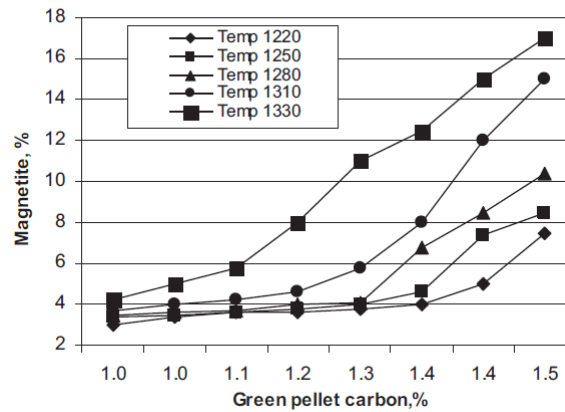


Figura 4.8: Influência da adição de carbono na fase de magnetita em diferentes temperaturas (UMADEVI *et al.*, 2013).

Um outro estudo, desta vez realizado por Morbelli (2017), também confirmou a influência da dosagem de carbono no teor de magnetita presente nas pelotas de minério de ferro queimadas. Nesse estudo, foram produzidas pelotas de minério de ferro em laboratório com três diferentes níveis de carbono (0,7%, 1,0% e 1,3%). As fontes de carbono utilizadas foram carvão e coque. Para uma melhor compreensão da formação da magnetita nas pelotas, as amostras foram submetidas a análise em microscópio ótico.

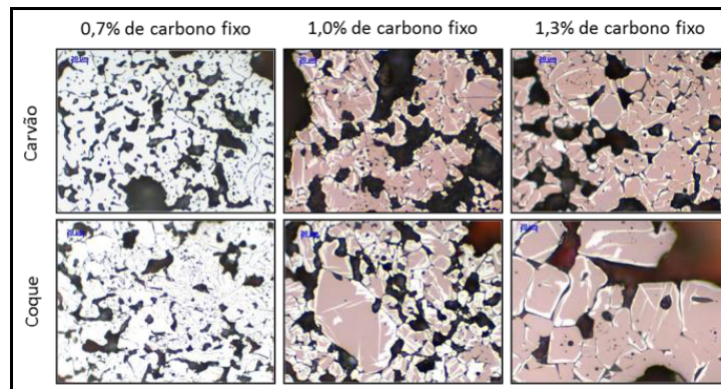


Figura 4.9: Imagem de micrografia da região central das pelotas (MORBELLI, 2017).

Como pode ser observado, à medida que a dosagem de carbono adicionado a mistura para formação das pelotas cruas é aumentada, ocorre uma elevação da quantidade de magnetita (região rosácea) nas pelotas queimadas. Também é perceptível que uma maior dosagem de carbono favorece o crescimento dos grãos, o que aumenta as tensões internas e compromete a resistência física das pelotas.

Outra característica relacionada a formação de magnetita em pelotas de minério de ferro está relacionada com a forma como as pelotas são queimadas. No forno de grelha móvel, que é o tipo de forno mais utilizado nas usinas de pelletização da Vale, as pelotas são queimadas em camadas. Dessa forma, as pelotas posicionadas na parte superior da

camada estão expostas a uma temperatura mais elevada que as pelotas localizadas na parte inferior. Como resultado, as pelotas da parte superior tendem a formar quantidades maiores de magnetita.

4.6 Influência da presença de magnetita em pelotas de minério de ferro

Diversos autores como Meyer (1980), Umadevi *et al.* (2013), Dwarapudi e Rao (2007) e Sá *et al.* (2004) reportam os efeitos deletérios da magnetita nas propriedades físicas das pelotas de minério de ferro. A formação de magnetita ocorre com maior concentração nas regiões mais internas das pelotas. Isso propicia a formação de uma estrutura duplex, contendo magnetita no núcleo e hematita nas camadas mais externas das pelotas. A capacidade de suportar e cargas e impactos da estrutura duplex é baixa, resultando em uma baixa resistência física das pelotas.

Resultados obtidos por Umadevi *et al.* (2013) demonstram que as propriedades físicas de CCS e TI das pelotas de minério de ferro são influenciados pelo teor de magnetita. No experimento, pelotas com diferentes teores de FeO tiveram suas propriedades físicas medidas. Conforme os resultados apresentados da Figura 4.10, pelotas com maiores teores de FeO , e conseqüentemente maiores teores de magnetita, apresentam uma diminuição na resistência física.

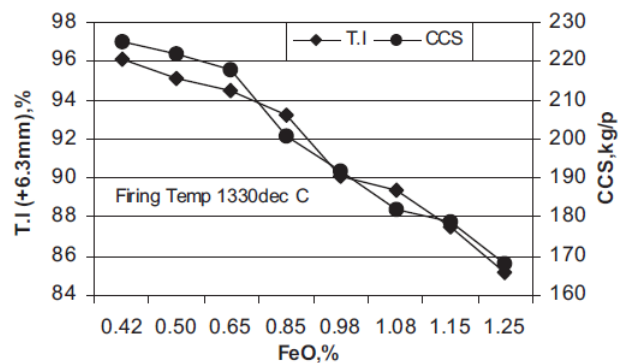


Figura 4.10: Influência do teor de FeO nas propriedades de TI e CCS (UMADEVI *et al.*, 2013).

4.7 Discussão

Nesse capítulo foi apresentado o processo de pelletização de minério de ferro. Também foram discutidos a influência do teor de magnetita na resistência física das pelotas produzidas e o processo de formação de magnetita nas pelotas.

O processo de formação de magnetita em pelotas de minério de ferro ocorre na etapa térmica de endurecimento. Portanto, a informação do teor de magnetita nas pelotas produzidas é importante para adequar a temperatura de queima. Essa regulação na temperatura possibilita uma economia no consumo térmico e uma diminuição da formação de magnetita, o que leva a ganhos de qualidade.

Capítulo 5

Estudo de metodologias para medição de teor de magnetita

5.1 Introdução

Neste capítulo são descritos os primeiros experimentos realizados para o desenvolvimento do protótipo do medidor de magnetita em pelotas de minério de ferro. Os objetivos principais desses experimentos foram de estudar o comportamento magnético das pelotas de minério de ferro, avaliar diferentes metodologias para estimar teores de magnetita em amostras a partir de propriedades magnéticas e reproduzir parcialmente alguns resultados encontrados na literatura.

No primeiro experimento, pelotas de minério de ferro produzidas em planta piloto foram classificadas de acordo com a força de atração gerada por imã permanente. No segundo experimento, foi utilizado o princípio da auto-indutância para estimar quantidades de concentrado de magnetita em tubos plásticos. No terceiro experimento, por sua vez, utilizou-se o princípio da indutância mútua para estimar quantidades de magnetita em tubos plásticos e em pelotas de minério de ferro.

5.2 Classificação de pelotas de minério de ferro com ímã permanente

É perceptível que as pelotas de minério de ferro apresentam diferentes graus de magnetismo. Com um simples imã, é possível identificar que algumas pelotas são atraídas com maior intensidade do que outras. Foi realizado um ensaio com o objetivo de verificar se as diferentes forças de atração apresentadas pelas pelotas estão relacionadas aos teores de magnetita. Pelotas de minério de ferro produzidas na planta piloto das instalações de pelotização da unidade de Vitória (Vale SA) foram classificadas em três grupos distintos, de acordo com a força de atração causada por um imã, conforme descrito a seguir:

- (-) Magnéticas: refere-se a pelotas com baixa atração (não possuem magnetismo suficiente para serem arrastadas pelo imã sobre uma superfície);
- (+) Magnéticas: refere-se a pelotas com uma média atração (são arrastadas pelo imã sobre uma superfície);
- (++) Magnéticas: refere-se a pelotas com uma alta atração (possuem força de atração suficiente para serem levantadas pelo imã);

Posteriormente a classificação, o teor de magnetita de cada grupo foi medido por análise química de FeO , no próprio laboratório de Vitória. Conforme descrito pela equação 3.1, o teor de magnetita das amostras pode ser calculado a partir do teor de FeO medido. Os resultados das análises químicas seguem na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultado das análises químicas de FeO para cada grupo de amostras

Grupo	$FeO(\%)$
(-) Magnéticas	0,81
(+) Magnéticas	2,32
(++) Magnéticas	3,90

De acordo com os resultados obtidos, o grupo (-) Magnéticas apresentou o menor teor de FeO , o grupo (+) Magnéticas apresentou um valor intermediário e o grupo (++) Magnéticas apresentou o maior teor de FeO . Esses resultados ratificam que existe uma relação entre a força de atração causada por um imã com o teor de magnetita das pelotas.

5.3 Análise de magnetita por auto-indutância

Neste experimento, foram realizadas análises utilizando o princípio da auto-indutância, ou simplesmente, indutância. O objetivo foi analisar como diferentes massas de concentrado de magnetita inseridas no núcleo de uma bobina modificam o valor de indutância medido. Essa abordagem também foi utilizada por Simões *et al.* (2014) para medir o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro, conforme descrito na seção 3.4.4.

A indutância de uma bobina depende, além de outros fatores, da permeabilidade magnética do núcleo, conforme descrito pela equação 2.4. O método de análise por auto-indutância consiste em inserir material magnético no núcleo de uma bobina e avaliar as mudanças ocorridas no valor da indutância. O material magnético altera a permeabilidade magnética do núcleo (μ) e, conseqüentemente, o valor da indutância (L) resultante.

Um experimento foi elaborado para compreender como diferentes massas de magnetita inseridas no núcleo de uma bobina afetam no valor de indutância medida. O objetivo foi avaliar a eficiência da metodologia de medição por auto-indutância e reproduzir parcialmente os experimentos realizados por Simões *et al.* (2014). No experimento, foram

utilizadas amostras de concentrado de magnetita em granulometria fina colocadas em tubos plásticos e inseridas no núcleo da bobina.

Foram preparadas 10 amostras com diferentes massas de concentrado de magnetita colocadas em tubos plásticos. As amostras possuíam entre 0,1 g à 1,0 g, com um intervalo de 0,1 g entre cada amostra. As amostras foram preparadas utilizando uma balança com precisão de 0,01 g. Esses valores de massas foram intencionalmente escolhidos para avaliar a sensibilidade do método em identificar pequenas variações de massas de concentrado de magnetita. O teor de magnetita das pelotas produzidas nas instalações de pelotização da Vale SA variam normalmente entre 0% a 2%. Essa faixa estreita representa um desafio para as medições. O conjunto de amostradas utilizadas são ilustradas na Figura 5.1.



Figura 5.1: Amostras de concentrado de magnetita em tubos

Na realização do experimento, os tubos de amostras foram inseridos individualmente no interior da bobina e observado o efeito causado no valor da indutância. O valor de indutância da bobina foi medido para cada amostra com o auxílio de uma Ponte LCR. A Ponte LCR é um equipamento que permite medir a indutância (L), a capacitância (C) e a resistência (R) de componentes eletrônicos. A configuração utilizada no experimento é ilustrados na Figura 5.2.

A bobina utilizada foi produzida manualmente, enrolando-se um fio de cobre esmaltado em um tubo plástico de PVC. O PVC é um material magneticamente inerte e não possui influência significativa na indutância da bobina. As especificações da bobina construída seguem na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros construtivos da bobina

Número de espiras	100
Diâmetro (cm)	3,2
Comprimento (cm)	2,5
Indutância (mH)	0,2644

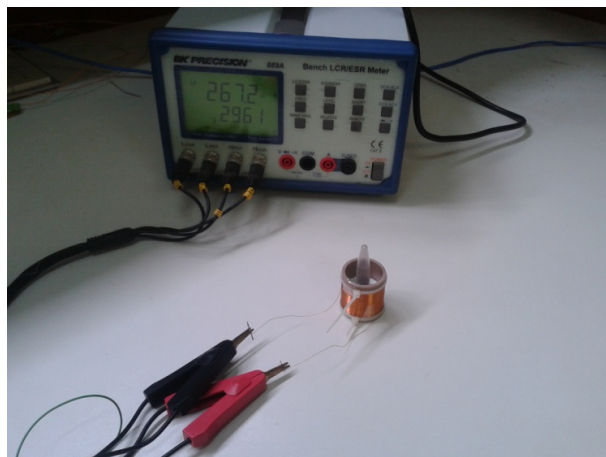


Figura 5.2: Medição de indutância com Ponte LCR

Os resultados obtidos com a realização do presente experimento estão apresentados na Tabela 5.3. De acordo com os resultados, os valores de indutância medidos na bobina aumentam à medida que massas maiores de magnetita são inseridas no núcleo. Por regressão linear, foi possível obter uma relação que permite estimar a quantidade de magnetita das amostras a partir do valor de indutância medido, conforme Figura 5.3. A relação entre a massa de amostra e indutância é linear, com um coeficiente de determinação (r^2) de 99,6%.

Tabela 5.3: Valores de indutância medidos para diferentes massas de magnetita

Massa da amostra (g)	Indutância (μH)	Indutância (μH) em relação ao zero
0	264,4	0
0,1	264,6	0,2
0,2	264,8	0,4
0,3	265,0	0,6
0,4	265,2	0,8
0,5	265,6	1,2
0,6	265,8	1,4
0,7	266,0	1,6
0,8	266,3	1,9
0,9	266,5	2,1
1,0	266,7	2,3

Vale ressaltar que o intervalo de variação de indutância medida é estreito, de apenas $2,3 \mu H$ entre $0,0 g$ e $1,0 g$ de concentrado de magnetita. Essa pequena faixa demanda uma alta sensibilidade do instrumento de medida para identificar pequenas variações de massa de magnetita, o que pode criar algumas dificuldades de medição.

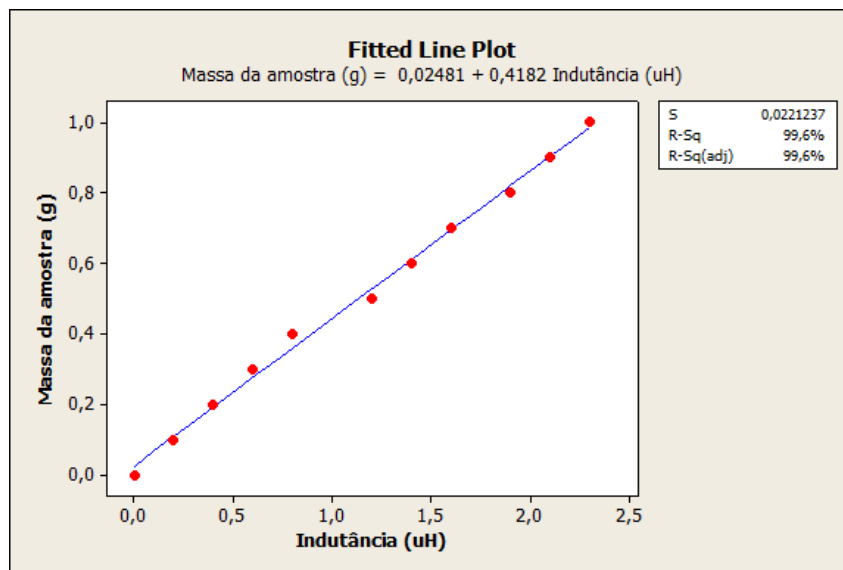


Figura 5.3: Gráfico de linha ajustada para o experimento por auto-indutância

5.4 Análise de magnetita por indutância mútua

Foram realizados dois experimentos utilizando o princípio da indutância mútua. O primeiro experimento foi realizado com concentrado de magnetita e o segundo experimento com pelotas de minério de ferro. O princípio físico da indutância mútua foi discutido na seção 2.5.

5.4.1 Experimento com concentrado de magnetita

Neste experimento, o princípio da indutância mútua foi utilizado para correlacionar diferentes massas de concentrado de magnetita com a tensão induzida na bobina secundária. Foram utilizadas as mesmas amostras de concentrado de magnetita em tubos descritas no experimento anterior (seção 5.3). O objetivo foi avaliar a eficiência do método de indutância mútua em estimar as quantidades de magnetita das amostras. Para o experimento, foi utilizado um arranjo com duas bobinas dispostas a uma distância que permite a inserção dos tubos de amostras entre elas, conforme ilustrado na Figura 5.4.

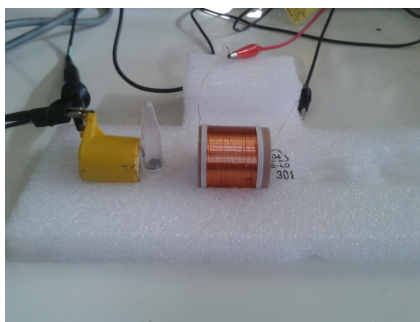


Figura 5.4: Teste com amostras de magnetita.

A bobina do primário foi produzida manualmente, enrolando-se fio de cobre esmaltado em um carretel de tubo PVC. Para o secundário, foi utilizada uma bobina de válvula solenoide. Os parâmetros construtivos de ambas as bobinas estão descritos na Tabela 5.4. O primário foi excitado com uma onda senoidal com frequência de 5 kHz e tensão de 5 mV_{rms} , fornecida por um gerador de sinais comercial, utilizado em bancadas de laboratório. Esses valores foram escolhidos de forma experimental, visando obter menor ruído na leitura de tensão induzida. Os valores de tensão induzida nos terminais do secundário foram lidos por osciloscópio digital.

Tabela 5.4: Parâmetros construtivos das bobinas

	Primário	Secundário
Número de espiras	100	9926 (calculado)
Diâmetro (cm)	3,2	1,1
Comprimento (cm)	2,5	2,8
Indutância (mH)	0,2644	426,9

No experimento, cada amostra foi individualmente inserida entre as bobinas e o valor de tensão induzida registrado. As bobinas estavam fixadas a uma distância de 3,2 cm entre elas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.5. O valor da tensão induzida está em termos de tensão eficaz (rms).

Tabela 5.5: Valores de tensão induzida

Massa de magnetita (g)	Tensão induzida (mV_{rms})	Tensão induzida (mV_{rms}) em relação ao zero
0	376,0	0,0
0,1	377,0	1,0
0,2	378,0	2,0
0,3	379,0	3,0
0,4	380,0	4,0
0,5	381,0	5,0
0,6	383,0	7,0
0,7	384,0	8,0
0,8	385,0	9,0
0,9	386,0	10,0
1,0	387,0	11,0

De acordo com os resultados, a tensão induzida no secundário aumenta a medida que aumenta a massa de magnetita contida nas amostras. Por regressão linear foi obtida uma relação matemática que estima a quantidade de magnetita das amostras a partir do valor de tensão induzida medida, conforme Figura 5.5. A relação entre a massa de magnetita e tensão induzida no secundário é linear, com um r^2 de 99.5%.

Os métodos por auto-indutância e indutância mútua possuem grandezas de saída diferentes. No método de auto-indutância, a grandeza medida é a indutância da bobina

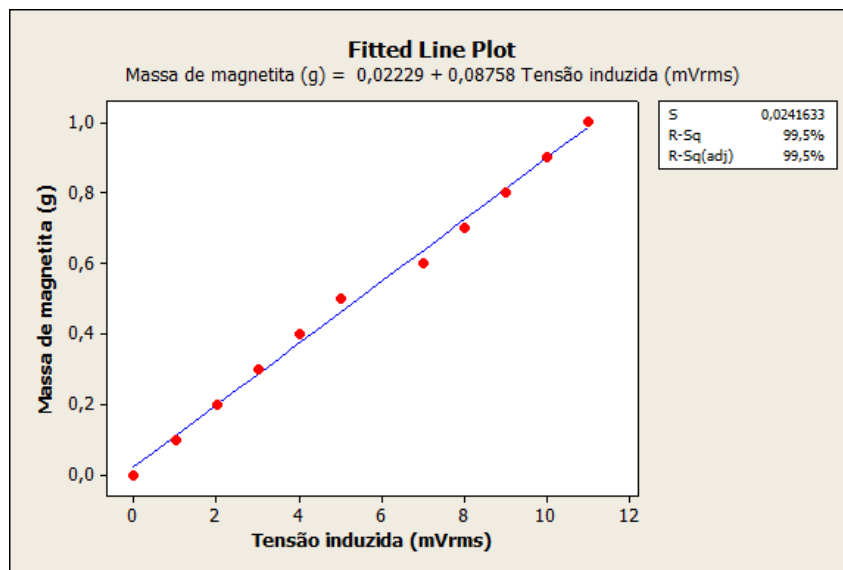


Figura 5.5: Gráfico de linha ajustada do experimento por indutância mútua.

(μH). Já no método de indutância mútua, a grandeza medida é a tensão induzida (mV_{rms}) na bobina secundária.

Em relação ao experimento realizado, o equipamento para leitura de tensão (osciloscópio) possui uma maior resolução que o equipamento utilizado na leitura da indutância (ponte LCR). Vale ressaltar que a leitura de tensão é mais simples que a leitura de indutância em termos de desenvolvimento de circuitos eletrônicos. Por esses motivos, o método de indutância mútua foi selecionado como princípio de funcionamento do protótipo proposto para a análise do teor de magnetita em pelotas de minério de ferro.

5.4.2 Experimento com pelotas de minério de ferro

Neste experimento, o princípio da indutância mútua foi utilizado para identificar diferentes teores de magnetita em pelotas de minério de ferro. Foram utilizadas as mesmas bobinas e a mesma montagem do experimento anterior, descritas na subseção 5.4.1.

O experimento consistiu em introduzir individualmente pelotas de minério de ferro com teores de magnetita desconhecidos entre as bobinas. Para cada pelota, foi registrado o valor de tensão induzida medido na bobina secundária. A montagem do experimento é mostrada na Figura 5.6.

Após as medições, algumas pelotas foram classificadas em três grupos distintos em relação ao valor de tensão induzida, conforme descrito a seguir. Os grupos de pelotas estão ilustrados na Figura 5.7.

- Grupo 1: Baixa tensão induzida (375-380mV)
- Grupo 2: Média tensão induzida (381-386mV)
- Grupo 3: Alta tensão induzida (387-392mV)

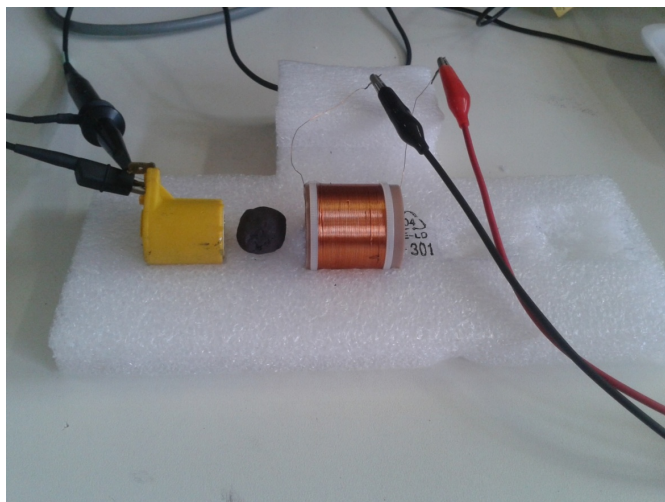


Figura 5.6: Experimento com pelotas.



Figura 5.7: Grupos de pelotas.

Três pelotas de cada grupo foram submetidas a análise química de FeO , realizada no laboratório da Fundação Gorceix, localizado na cidade de Ouro Preto/MG. O laboratório desconhecia qualquer informação em relação à composição ou mesmo das leituras de tensão obtidas para cada pelota. O teor de FeO das pelotas está diretamente relacionado ao teor de magnetita, conforme equação 3.1. Os resultados da análise química seguem na Tabela 5.6.

Conforme esperado, amostras com leituras idênticas de tensão induzida apresentaram valores próximos de massas de FeO . Entretanto, a amostra 2A apresentou um resultado discrepante em relação às outras amostras do mesmo grupo, mas as causas não foram identificadas.

Tabela 5.6: Resultados da análise de FeO

Grupos	Tensão induzida(mVrms)	Amostra	Massa Pelota(g)	FeO(%)	Massa de FeO(g)
Grupo 1	375 - 376	1A	11,1798	1,58	0,18
		1B	9,8503	1,58	0,16
		1C	8,5481	2,15	0,18
Grupo 2	382 - 383	2A	9,723	1,01	0,10
		2B	8,8844	3,88	0,34
		2C	7,1366	4,45	0,32
Grupo 3	391 - 392	3A	14,5486	4,02	0,58
		3B	12,3935	4,74	0,59
		3C	5,6422	8,90	0,50

5.5 Discussão

O primeiro experimento, de classificação de pelotas por um ímã permanente, demonstrou fortes indícios de que as diferentes forças de atração apresentados pelas pelotas de minério de ferro estão relacionadas aos diferentes teores de magnetita na composição. Dessa forma, quanto maior a atração magnética, maior o teor de magnetita nas pelotas.

Os resultados dos experimentos por auto-indutância e por indutância mútua mostraram a existência de uma relação linear entre as massas de concentrado de magnetita e os sinais lidos por cada método. Além disso, o método por indutância mútua também mostrou que é possível identificar pelotas com diferentes teores de magnetita de acordo com a tensão induzida no secundário.

Com base nos resultados dos experimentos, o método da indutância mútua possui algumas vantagens em relação ao método de auto-indutância. A leitura da grandeza tensão é mais simples do que a leitura da grandeza indutância em relação ao desenvolvimento de circuitos de medição. Além do mais, nos experimentos realizados, o equipamento utilizado para leitura de tensão possui uma resolução maior de medida que o equipamento utilizado para leitura de indutância. Portanto, o método de indutância mútua foi escolhido como princípio de funcionamento para o desenvolvimento do protótipo proposto do medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro.

Capítulo 6

Protótipo do Medidor de Magnetita em Pelotas de Minério de Ferro

6.1 Introdução

O protótipo do medidor foi projetado para uso em laboratórios de instalações de pelotização, para fornecer informações rápidas do teor de magnetita de amostras de pelotas de minério de ferro. O objetivo é a utilização dessas informações de teores de magnetita no auxílio às tomadas de decisões aplicadas aos sistemas de controle do processo. Neste capítulo, são descritos o princípio de funcionamento e as características construtivas do protótipo.

6.2 Princípio de funcionamento

As pelotas de minério de ferro possuem propriedades magnéticas importantes, o que favorece a medição do teor de magnetita por meio da permeabilidade magnética. O protótipo foi inspirado nos fundamentos dos transformadores elétricos e utiliza o princípio da indutância mútua para estimar o teor de magnetita nas pelotas.

O protótipo possui duas bobinas magneticamente acopladas e conectadas por um núcleo aço silício. Em uma das bobinas, denominada de primário, circula uma corrente alternada (CA), que gera um campo magnético variável. Esse campo magnético enlaça a outra bobina, denominada de secundário, e induz uma fem nos terminais dessa bobina. Entre as bobinas, há um espaço que recebe um compartimento que contém as amostras de pelotas para análise. O núcleo, construído em aço silício, possui uma elevada permeabilidade magnética e tem a função de conduzir o fluxo magnético entre as bobinas. A estrutura física do protótipo é apresentada na Figura 6.1.

Quando uma amostra de pelotas é introduzida entre as bobinas, a permeabilidade magnética do meio (μ) é alterada. O vetor densidade de fluxo magnético (B) produ-

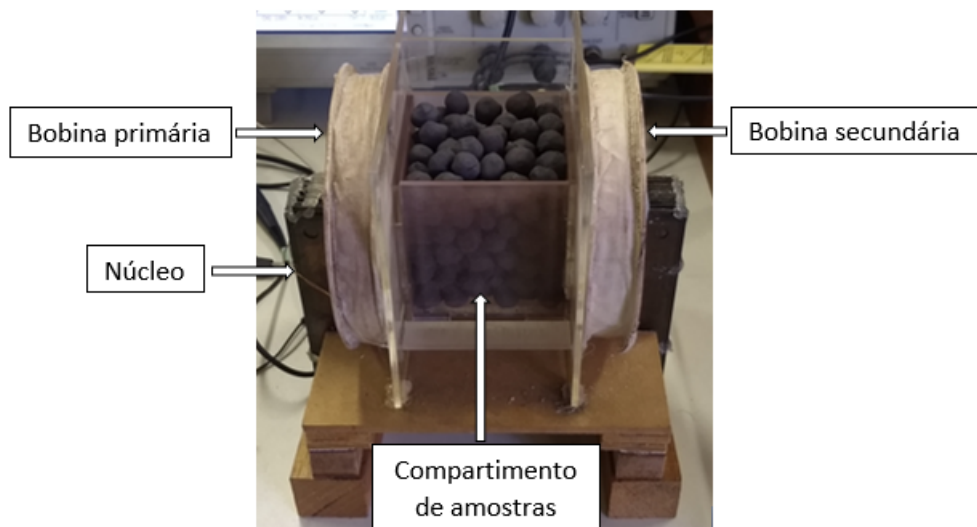


Figura 6.1: Estrutura física do protótipo

zido no primário relaciona-se com a permeabilidade magnética do meio, de acordo com a equação 2.1. Portanto, quanto maior o teor de magnetita da amostra, maior permeabilidade magnética do meio e maior o vetor densidade de fluxo magnético produzido. Consequentemente, mais linhas de fluxo atravessam o secundário e maior é o valor da *fem* induzida. Dessa forma, a *fem* induzida do secundário é proporcional ao teor de magnetita da amostra.

6.3 Descrição do protótipo

O protótipo foi projetado para realizar a medição em amostras formadas por um grupo de pelotas. O compartimento de amostras deve ser completamente preenchido de pelotas para a realização das análises. Essa abordagem é distinta das apresentadas por Simões *et al.* (2014) e Souza (2006), descritos respectivamente nas seções 3.4.4 e 3.4.3, em que as pelotas são medidas individualmente.

De acordo com os resultados obtidos por Simões *et al.* (2014), em uma análise individual, a presença de trincas nas pelotas altera a sua densidade e distorce os resultados das medições. Além disso, as pelotas produzidas pelo processo de pelletização possuem uma variabilidade de formas e tamanhos. Em uma análise individual, essa variabilidade resulta em diferentes proporções de ar e pelota (fator de preenchimento) na região de medição, refletindo nos resultados das análises. Por exemplo, duas pelotas de teores semelhantes, porém de tamanhos distintos, podem apresentar leituras diferentes. Também, na abordagem individual, uma única pelota pode não representar uma amostra como um todo, sendo necessária a realização da medição em várias pelotas para obter um valor médio representativo do teor de uma amostra. Todos esses efeitos da análise individual de pelotas também foram observados nos resultados obtidos com o equipamento desenvolvido

por Souza (2006).

Com base nas desvantagens apresentadas pela medição individual, foi proposta a medição em grupo de pelotas. O objetivo é tornar o fator de preenchimento mais constante para diferentes amostras e obter diretamente um valor médio representativo do teor das amostras.

O procedimento para as análises consiste basicamente em preencher um compartimento com amostras de pelotas e inserir no protótipo. Em uma versão final do equipamento, o resultado da análise será apresentado em um *display*, com resultados disponíveis em poucos segundos. As análises são não-destrutivas, ou seja, não é necessário o preparo das amostras, como pulverização e homogenização. O protótipo do medidor desenvolvido é apresentado na Figura 6.2.

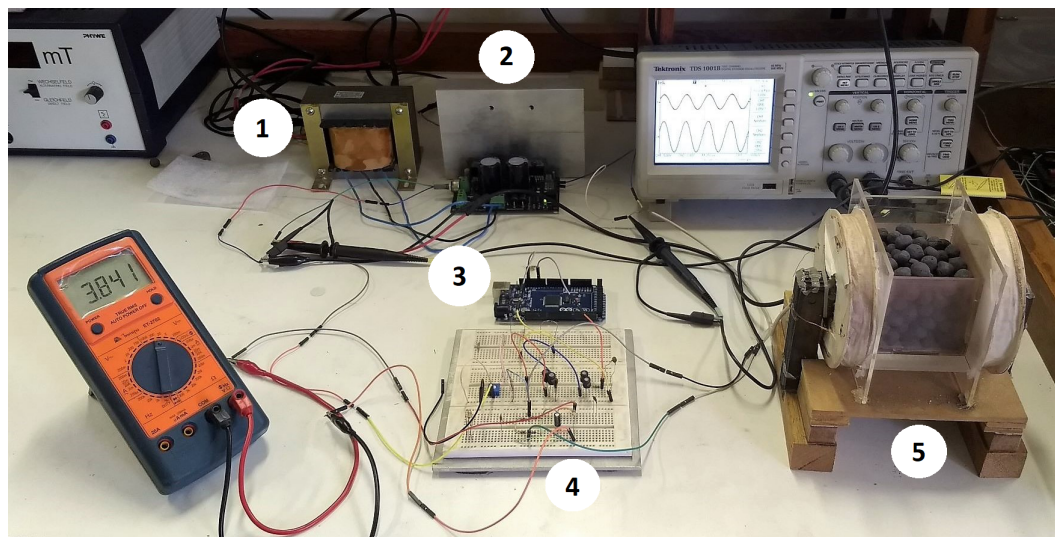


Figura 6.2: Protótipo do medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro

Os componentes do protótipo do medidor desenvolvido estão enumerados na Figura 6.2 e são descritos a seguir:

- (1): Transformador elétrico para alimentação de um amplificador de potência;
- (2): Amplificador de potência;
- (3): Arduino MEGA 2560;
- (4): *Protoboard* contendo um circuito de filtro e um circuito de retificador;
- (5): Estrutura do compartimento de amostras, bobinas e núcleo.

O dispositivo funciona com um sistema eletrônico microcontrolado, para geração e aquisição de sinais e processamento de dados. A onda senoidal que excita a bobina primária do dispositivo é produzida digitalmente pelo microcontrolador utilizando a técnica *Direct Digital Synthesis* (DDS). O sinal gerado é então amplificado e aplicado na

bobina primária. A tensão induzida no secundário é convertida em um sinal de corrente contínua por meio de um retificador e amostrado pelo conversor A/D do microcontrolador. O microcontrolador calcula o teor médio de magnetita das pelotas a partir de uma equação matemática que descreve o teor de magnetita das amostras em relação à tensão induzida no secundário. O resultado da análise é apresentado em um mostrador digital em termos de porcentagem de magnetita. O diagrama esquemático de funcionamento do dispositivo é apresentado na Figura 6.3.

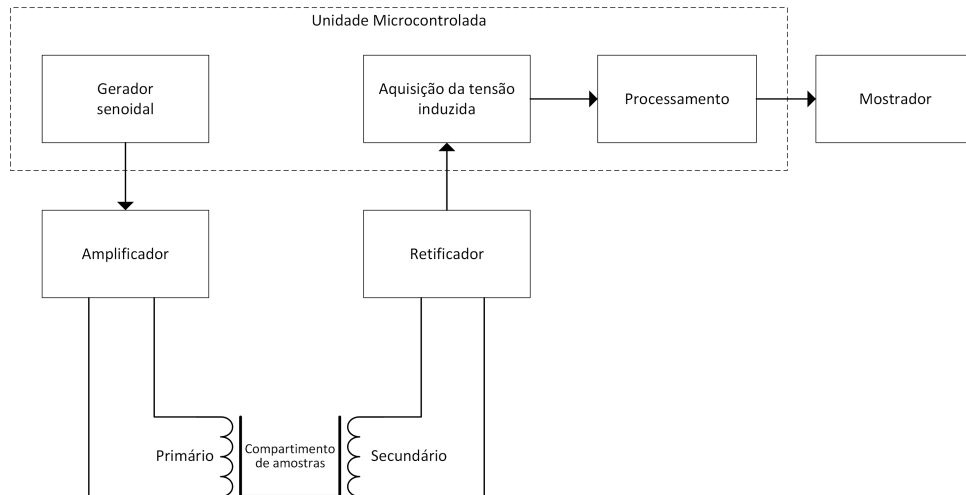


Figura 6.3: Diagrama esquemático do protótipo do equipamento.

6.3.1 Compartimento de amostras

O compartimento de amostras recebe as pelotas a serem analisadas. O compartimento é móvel, de forma que pode ser retirado do protótipo para o preenchimento com as amostras de pelotas. O compartimento foi construído em material acrílico, com placas de 3mm de espessura. As dimensões do compartimento são as seguintes: comprimento (7 cm), largura (7 cm), altura (7 cm) e volume (343 cm³). O acrílico é um material magneticamente inerte e não influencia no fluxo magnético que percorre o equipamento.

O número de pelotas necessárias para preencher o compartimento é relativo ao tamanho das pelotas das amostras. Nas amostras utilizadas nos experimentos descritos nessa dissertação, foram necessárias aproximadamente 200 pelotas para preencher o compartimento. O compartimento de amostras está ilustrado na Figura 6.4.

6.3.2 Bobinas

As bobinas do primário e do secundário foram produzidas com fio de cobre esmaltado enrolados em carretéis construídos em material PVC. O PVC é um material magneticamente inerte, sendo ideal para a aplicação proposta. As espiras das bobinas foram enroladas no carretel com o auxílio de uma bobinadeira. As características físicas das bobinas estão



Figura 6.4: Compartimento de amostras preenchido com pelotas de minério de ferro.

descritas na Tabela 6.1. A relação de enrolamentos das espiras, contendo 100 espiras no primário e 600 espiras no secundário, amplifica o sinal de saída, dispensando o uso de circuito amplificador para leitura da resposta do instrumento.

Tabela 6.1: Características construtivas das bobinas

Grandeza	Primário	Secundário
Diâmetro da bobina	10 <i>cm</i>	10 <i>cm</i>
Número de enrolamentos	100	600
Diâmetro do fio	20 AWG	20 AWG
Indutância	2,107 <i>mH</i> a 1 <i>kHz</i>	61,66 <i>mH</i> a 1 <i>kHz</i>
Impedância	16,46 ohm a 1 <i>kHz</i>	392,2 ohm a 1 <i>kHz</i>
Resistência	9,83 ohm	54,2 ohm

6.3.3 Núcleo de aço silício

O núcleo foi construído com placas de aço silício retiradas de um transformador elétrico. As placas foram cortadas para adequação ao formato do núcleo, sobrepostas umas as outras e fixadas com verniz e abraçadeiras em nylon. O núcleo construído é apresentado na Figura 6.5.

O núcleo concentra as linhas de fluxo magnético produzidas pelo primário, o que diminui a dispersão de fluxo no entorno do protótipo. Como resultado, o núcleo promove um aumento na sensibilidade das medições e reduz possíveis ruídos externos na leitura provocadas pela presença de materiais magnéticos nas proximidades do protótipo.

O núcleo de um transformador elétrico é projetado para operar na frequência de 60 *Hz*. O protótipo proposto opera a uma frequência de 1600 *Hz*. Como o núcleo do protótipo foi construído com placas de um transformador, essa frequência de 1600 *Hz* poderia produzir aquecimento no núcleo devido à histerese do aço silício. Porém, a intensidade do campo magnético produzido no protótipo não é suficiente para produzir esse efeito térmico.

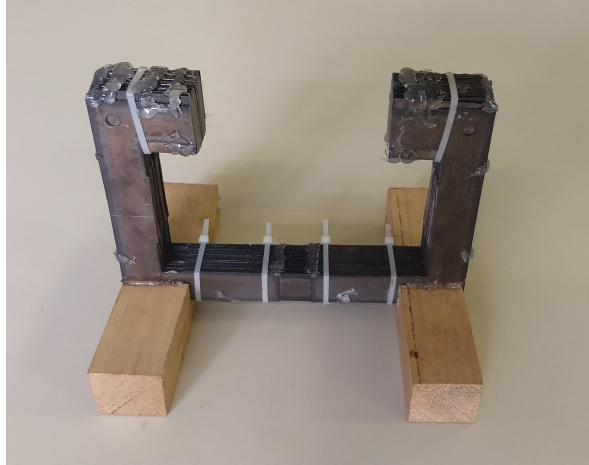


Figura 6.5: Núcleo de aço silício.

6.3.4 Microcontrolador

O protótipo do medidor de magnetita possui um microcontrolador que realiza as tarefas de processamento de sinais provenientes dos circuitos eletrônicos do protótipo. Para isso, foi utilizado a plataforma eletrônica Arduino MEGA 2560, que possui um microcontrolador Atmel integrado ao hardware. A placa de circuito do Arduino MEGA 2560 é ilustrado na Figura 6.6.

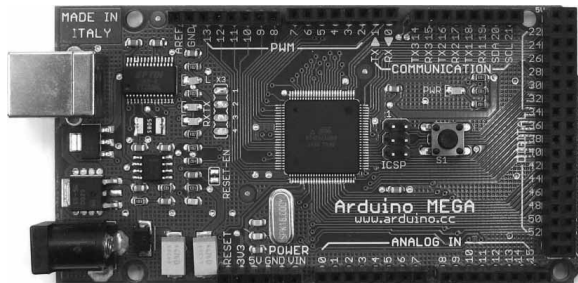


Figura 6.6: Arduino MEGA (MCROBERTS, 2011).

O Arduino é uma plataforma eletrônica de computação embarcada, que pode ser programada para processar entradas e saídas de componentes externos conectados ao dispositivo. A plataforma do Arduino possui hardware e software abertos, ou seja, pode ser usada livremente para qualquer tipo de aplicação. Em relação à programação, O Arduino possui uma IDE baseada em linguagem C/C++ (MCROBERTS, 2011).

A função do Arduino no protótipo é a geração da onda senoidal que excita a bobina primária, a leitura dos valores de tensão induzida na bobina secundária, o processamento dos dados e o cálculo da estimativa do teor de magnetita das amostras de pelotas.

6.3.5 Gerador Senoidal

A onda senoidal é gerada digitalmente pelo microcontrolador utilizando a metodologia de Síntese Digital Direta (DDS). O código fonte do algoritmo implementado está anexado no Apêndice A.2. A Síntese Digital Direta permite produzir formas de ondas arbitrárias, como por exemplo, ondas senoidais. Segundo Schuler (2013) um sintetizador digital direto é constituído basicamente por uma palavra de sintonia de frequência e um acumulador de fases, uma tabela de pesquisa de uma onda senoidal, um conversor D/A e um sinal de *clock* (SCHULER, 2013). Um diagrama dos componentes de um sintetizador digital direto é mostrado na Figura 6.7.

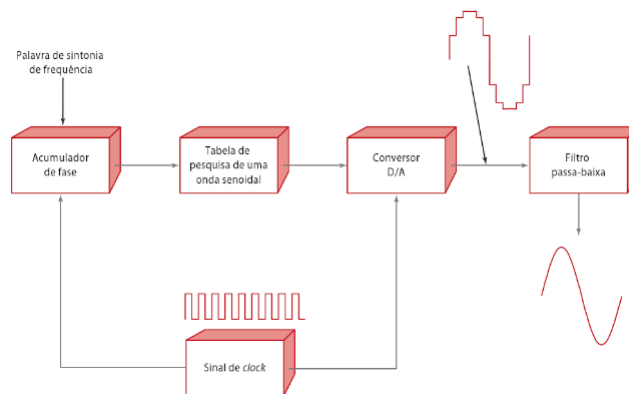


Figura 6.7: Diagrama esquemático de um sistema DDS (SCHULER, 2013).

A palavra de sintonia de frequência e o acumulador de fases são duas variáveis inteiras. A tabela de pesquisa de uma onda senoidal possui uma lista numérica que corresponde a um período completo de uma onda seno armazenada em uma memória. O conversor D/A utiliza a saída de PWM e o sinal de clock é obtido por um *timer* interno de hardware do Arduino (DEVICES, 2009).

O acumulador de fases desloca de posição na tabela de pesquisa da onda senoidal a cada pulso de *clock*. Cada valor da senoide na tabela de pesquisa é transmitido para o conversor D/A, que produz uma tensão correspondente a onda senoidal para cada valor da fase. O filtro elimina os componentes de alta frequência, resultando em uma senoide suave (SCHULER, 2013).

Em suma, o microcontrolador produz um sinal de PWM com frequência variável e um conversor D/A recupera a forma de onda senoidal. No protótipo foi utilizado um filtro passa baixa de Chebyshev, com frequência de corte de 12 kHz . Foi adotada uma configuração para o filtro sugerida por Nawrath (2011), conforme o diagrama apresentado na Figura 6.8.

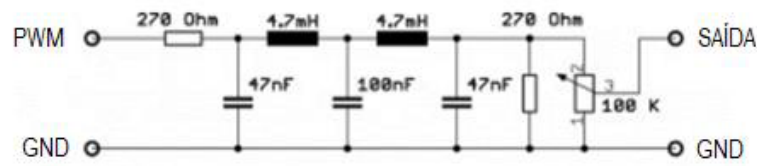


Figura 6.8: Configuração do filtro de Chebyshev.

6.3.6 Amplificador

A onda senoidal gerada pelo circuito eletrônico fornece uma baixa potência, insuficiente para entregar uma corrente adequada à bobina do primário. Portanto, foi empregado um amplificador de potência para elevar o sinal.

Segundo Sedra e Smith (1998), um amplificador é um componente eletrônico que recebe um sinal de entrada e fornece uma versão maior desse sinal para uma saída. Um amplificador de potência é simplesmente um amplificador com um estágio de saída de alta potência. Nesse contexto, consideram-se amplificadores que entregam potências maiores que 1W.

O protótipo construído utiliza um amplificador de potência comercial modelo MAC-KOUT pa200hdx2. O circuito eletrônico do amplificador possui dois circuitos integrados TDA 7294 ligados em ponte. O TDA 7294 é um amplificador de potência analógico da classe AB, geralmente utilizado em aplicações de áudio. Segundo o fabricante STMicroelectronics (2003), a ligação em ponte permite ao amplificador fornecer 170W de potência a uma bobina de 16 ohm de impedância. O objetivo do amplificador é elevar a potência do sinal da onda senoidal gerada pelo microcontrolador e aplicar na bobina primária. A placa de circuito integrado do amplificador de potência utilizada no protótipo é ilustrada na Figura 6.9

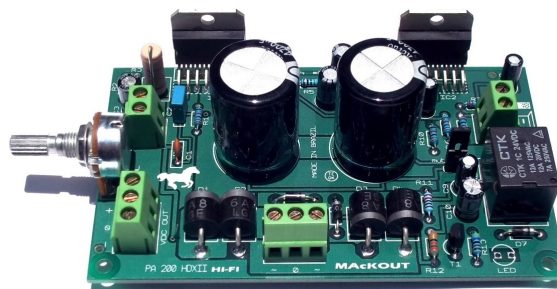


Figura 6.9: Placa de circuito impresso do amplificador de potência.

Nos amplificadores de classe AB, como o utilizado no protótipo, o transistor conduz somente durante metade ciclo do sinal de entrada, resultando em um ângulo de condução de 180°. Logo, é necessário que dois transistores operem em conjunto, de forma que cada um deles conduza em semiciclos opostos. Esse tipo de configuração é conhecido como

circuito *push-pull*, ilustrado na Figura 6.10.

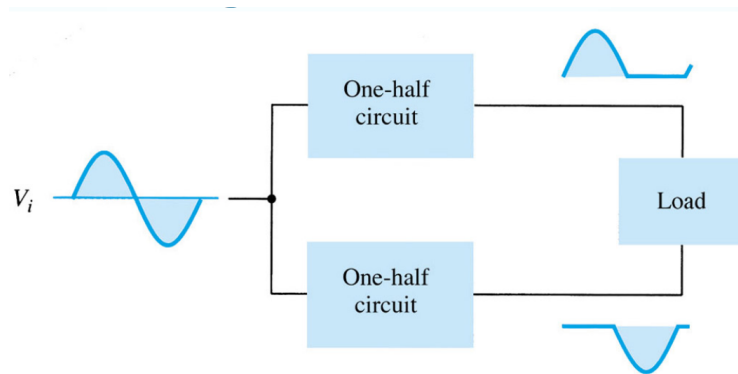


Figura 6.10: Configuração *push-pull* (SEDRA e SMITH, 1998).

6.3.7 Retificador

A tensão induzida nos terminais do secundário é um sinal alternado. Para facilitar a aquisição do valor de tensão induzida, o sinal é convertido para corrente contínua por meio de um retificador de ondas completas com filtro capacitivo. A configuração do retificador implementado no circuito eletrônico protótipo está representada no diagrama esquemático da Figura 6.11.

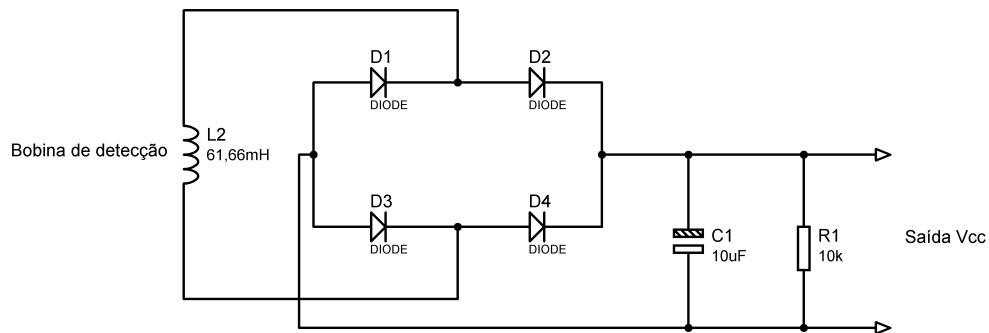


Figura 6.11: Diagrama esquemático do retificador.

6.3.8 Aquisição de dados

O microcontrolador realiza a aquisição dos valores de tensão induzida nos terminais da bobina secundária. O sinal é lido na saída do retificador, em corrente contínua. A resolução nativa do conversor A/D do Arduino MEGA 2560 é de 10 bits. Nesse caso, o menor incremento mensurável de tensão corresponde à 5 mV . Para melhorar a resolução da aquisição

da tensão induzida, foi implementada no algoritmo do microcontrolador a técnica *Oversampling*. Com isso, foi possível elevar a resolução para 13 bits, correspondendo a um incremento mensurável de $0,610\text{ mV}$.

Umas das aplicações da técnica oversampling é o incremento da resolução do número de bits em conversores A/D. Esse efeito é obtido à partir da amostragem do sinal de interesse em uma frequência superior ao critério de Nyquist-Shannon. Esse critério estabelece que a frequência mínima de amostragem deve ser, no mínimo, duas vezes superior à maior frequência do sinal amostrado (PUHLMANN, 2015).

No algoritmo de aquisição da tensão induzida também foi implementada a leitura por média móvel, para reduzir possíveis erros de leituras provenientes de ruídos externos e do próprio circuito eletrônico.

6.3.9 Processamento

Na etapa de processamento, o microcontrolador realiza os cálculos matemáticos necessários para estimar o teor de magnetita das amostra de pelota de minério de ferro. Um modelo matemático recebe o valor da tensão induzida lido e calcula o teor de magnetita das amostras. O modelo matemático foi obtido por procedimentos de calibração do protótipo, detalhados na seção 7.1.

6.4 Parâmetros de operação do protótipo

Nesta seção, são descritos os parâmetros de frequência e tensão do sinal CA aplicados na bobina primária do protótipo. Foi realizado um experimento para definir a frequência que fornece a maior sensibilidade nas medições de teor de magnetita. O experimento consistiu em manter um valor de tensão fixo aplicado na bobina primária (3 Vrms), variar a frequência do sinal CA e medir a tensão induzida na bobina secundária. O experimento foi realizado com o compartimento de amostras vazio. O resultado é apresentado na figura 6.12 .

De acordo com os resultados do experimento, um aumento da frequência na bobina primária provoca um aumento da tensão induzida na bobina secundária. Porém, a partir da frequência de 1600 Hz , a tensão induzida começa a diminuir. Ou seja, a maior tensão na bobina secundária é obtida aplicando-se 1600 Hz na bobina primária.

Foi observado em outros experimentos utilizando pelotas de minério de ferro que nessas condições de operação, as medições de teor de magnetita nas amostras possuem uma maior sensibilidade. Ou seja, nessa frequência o protótipo é capaz de identificar menores variações de teores nas amostras. Portanto, a frequência de 1600 Hz foi definida como padrão para excitar a bobina primária do protótipo.

O valor de tensão de 3 Vrms utilizado no experimento corresponde à máxima tensão

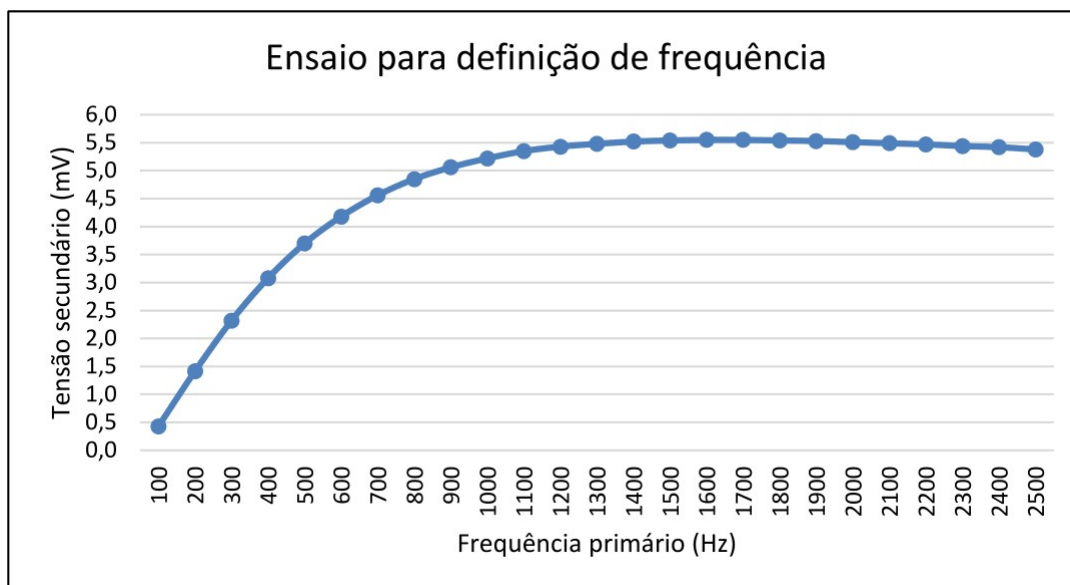


Figura 6.12: Resultado do experimento para definição da frequência de operação.

aplicada no primário que não provoca um aquecimento da bobina de forma perceptível. A temperatura afeta a resistência das espiras e varia a corrente que circula na bobina. Logo, a tensão de operação do protótipo foi fixada em $3V_{rms}$.

6.5 Discussão

Conforme descrito no capítulo, o protótipo do medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro possui o princípio de funcionamento baseado no fenômeno da indutância mútua. O protótipo conta com um sistema eletrônico microcontrolado para geração e aquisição de sinais necessários para as medições.

O protótipo foi construído com materiais de baixo custo de aquisição, como: acrílico, tubo de PVC, fio de cobre esmaltado, placas de aço silício e madeira. Os maiores custos estão envolvidos na parte eletrônica, principalmente o Arduino MEGA 2560. O uso desses materiais tornou baixo o custo de produção do protótipo. O custo por análise também é baixo, pois o protótipo dispensa a preparação de amostras e não utiliza reagentes químicos. O procedimento de medição consiste apenas em preencher um compartimento com amostras de pelotas e inserir no protótipo.

Capítulo 7

Resultados e Discussões

7.1 Introdução

Neste capítulo são descritos os procedimentos adotados para a calibração do protótipo. Foram comparadas as repostas do protótipo com as medições de teor de magnetita por análise química e Satmagan para diferentes amostras de pelotas de minério de ferro.

7.2 Amostras para calibração do protótipo

O procedimento de calibração do protótipo foi realizado com amostras de pelotas queimadas produzidas na usina de pelletização de Fábrica (Vale S.A), localizada na cidade Congonhas/MG. No total, foram utilizadas 10 amostras com diferentes teores de magnetita. Essas amostras refletem as características reais das pelotas produzidas na plantas de pelletização, como: tamanho, formas e composição química.

Cada uma das amostras obtidas do processo de pelletização foram divididas em duas frações. A primeira fração teve o teor de magnetita medido por análise química no laboratório da usina de Fábrica. A segunda fração, por sua vez, foi reservada para realização de experimentos com o protótipo. Após coletadas as informações pelo protótipo, as amostras da segunda fração tiveram o teores de magnetita medidos por análise química e pelo equipamento Satmagan, no laboratório da mina de Brucutu (Vale SA), localizado cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo/MG. Os procedimentos de análises realizados com as frações de cada amostras estão ilustrados na Figura 7.1. O objetivo dessa abordagem foi obter um comparativo entre os resultados de análise química obtidos por diferentes laboratórios, e também pelo equipamento Satmagan, que assim como o protótipo proposto, utiliza de propriedades magnéticas para as medições.

Os resultados das análises químicas de ambos os laboratórios estão apresentados na Tabela 7.1. Como pode ser observado, as análises químicas dos laboratórios obtiveram diferentes resultados de teor de FeO para as mesmas amostras de pelotas. Esses re-

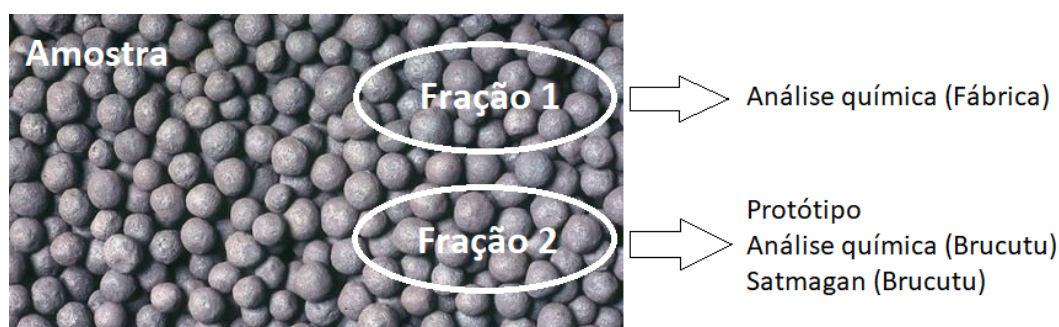


Figura 7.1: Procedimentos de análises das amostras

sultados foram controversos, pois eram esperados teores parecidos fornecidos pelos dois laboratórios. Apesar das análises químicas terem sido realizadas em frações diferentes, ambas frações pertenciam às mesmas amostras de pelotas.

Tabela 7.1: Resultados das análises químicas

Amostra	Fábrica FeO (%)	Brucutu FeO (%)	Desvio (%)
1	0,57	0,49	14,56
2	0,63	0,58	8,37
3	0,82	0,58	29,63
4	0,86	0,53	38,72
5	0,83	0,50	40,12
6	0,89	0,52	41,57
7	0,66	0,68	-3,18
8	0,95	0,50	47,79
9	0,66	0,50	23,94
10	0,28	0,42	-51,07

Também foi realizada uma comparação envolvendo os resultados das análises químicas e os resultados de teores de magnetita medidos pelo Satmagan. Para isso, os resultados de teores de FeO das análises químicas foram convertidos em termos de teores de magnetita, segundo o fator descrito na equação 3.1.

Os dados comparativos entre os resultados das análises químicas e do Satmagan são apresentados na Tabela 7.2. As análises por Satmagan foram realizadas duas vezes para cada amostra, identificadas como Satmagan (1) e Satmagan (2) na Tabela 7.2. Conforme os resultados apresentados, as duas medições pelo Satmagan apresentaram resultados consistentes entre si. A maior divergências ocorreu na amostra 10, com uma diferença em termos percentuais de 8,3%. Porém, os teores de magnetita calculados a partir das análises químicas, além de divergirem entre si, também divergem do teor medido pelo Satmagan.

Logo, foram obtidos três resultados de teores de magnetita distintos para cada amostra, sendo dois resultados por análise química e um por Satmagan. As causas dessas diferenças nos resultados não foram tema de estudo e devem ser objeto de investigações futuras.

Tabela 7.2: Comparativo entre análise química e Satmagan

Amostra	Fábrica Magnetita (%)	Brucutu Magnetita (%)	Satmagan (1) Magnetita(%)	Satmagan (2) Magnetita(%)
1	1,84	1,57	1,62	1,62
2	2,03	1,85	1,67	1,62
3	2,64	1,86	1,94	1,83
4	2,77	1,70	2,15	2,04
5	2,67	1,60	1,83	1,83
6	2,87	1,68	1,83	1,83
7	2,13	2,19	2,57	2,57
8	3,06	1,60	1,78	1,73
9	2,13	1,62	1,47	1,52
10	0,90	1,36	1,20	1,10

7.3 Avaliação das respostas do protótipo

Nesta etapa, as amostras de pelotas de minério de ferro descritas na seção anterior (7.2) foram medidas pelo protótipo. As pelotas de cada amostra foram preenchidas no compartimento de amostras e foram registrados os valores de tensão induzida correspondentes à cada amostra. Os resultados são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3: Respostas do protótipo para as amostras de pelotas

Amostra	Tensão (mV)
1	63,00
2	48,00
3	71,00
4	82,00
5	71,00
6	70,00
7	83,00
8	57,00
9	47,00
10	38,00

Uma característica observada nas amostras utilizadas é a heterogeneidade das pelotas em relação ao teor de magnetita. Essa característica é perceptível com um simples imã, em que algumas pelotas são mais fortemente atraídas que outras. Segundo os experimentos da seção 5.2, pelotas com maiores forças de atração por um imã possuem maiores quantidades de magnetita na composição. Portanto, em uma mesma amostra, existem pelotas com diferentes teores de magnetita. Essas características também foram observadas por Souza (2006), conforme descrito na seção 3.4.3.

Também foi observado durante os experimentos que o protótipo desenvolvido apresenta diferentes áreas de sensibilidade de leitura. Pelotas que possuem maiores teores de

magnetita causam uma maior variação na tensão induzida quando próximas da bobina primária. Por outro lado, quando essas pelotas estão próximas da bobina secundária, variação na tensão induzida é menor. Com o intuito de verificar se esse efeito é capaz de influenciar nas medições, foram realizadas quatro leituras de cada amostra, girando-se o compartimento entre cada leitura. Ou seja, foi tomada uma leitura para cada uma das orientações do compartimento de amostras. Os resultados seguem na Tabela 7.4.

Tabela 7.4: Leituras das quatro orientações do compartimento para cada amostra de pelotas

Amostra	Orient. 1 (mV)	Orient. 2 (mV)	Orient. 3 (mV)	Orient. 4 (mV)	Média (mV)	Desvio Padrão (mV)
1	63,00	61,00	64,00	62,00	62,50	1,29
2	48,00	48,00	49,00	49,00	48,50	0,58
3	71,00	72,00	71,00	74,00	72,00	1,41
4	82,00	83,00	84,00	81,00	82,50	1,29
5	71,00	72,00	72,00	71,00	71,50	0,58
6	70,00	73,00	71,00	71,00	71,25	1,26
7	83,00	87,00	83,00	85,00	84,50	1,91
8	57,00	59,00	59,00	56,00	57,75	1,50
9	47,00	51,00	48,00	51,00	49,25	2,06
10	38,00	39,00	38,00	41,00	39,00	1,41

Na Figura 7.2 é apresentado um gráfico de dispersão contendo o desvio (%) das quatro leituras em relação à leitura média de cada amostra. Os desvios foram calculados em relação à leitura média máxima observada, de 84,50 mV.

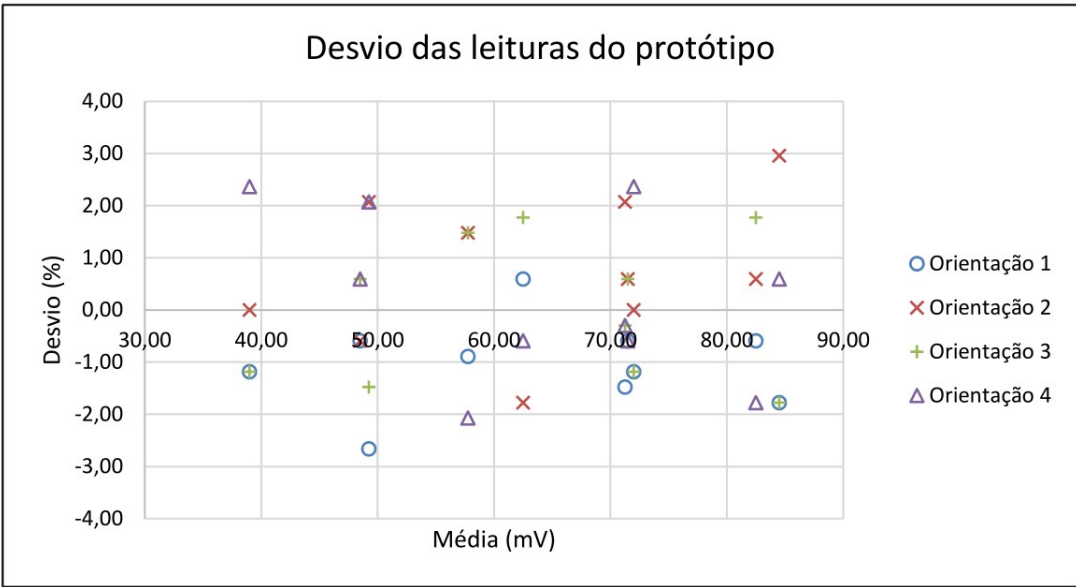


Figura 7.2: Dispersão das leituras do protótipo

Como pode ser observado, a dispersão é baixa, variando nos piores casos em aproximadamente $\pm 3\%$ em relação à média. Portanto, o efeito causado nas leituras devido às

diferentes áreas de sensibilidade na região de medição do protótipo é insignificante para as amostras testadas.

7.4 Calibração do protótipo

O procedimento de calibração do protótipo consiste em estabelecer a relação entre as respostas do protótipo e o valor de referência dos teores de magnetita das amostras de pelotas de minério de ferro. Conforme descrito na seção 7.2, os teores de magnetita das amostras foram medidos por análise química em dois laboratórios distintos e por Satmagan. Porém, as três medições forneceram resultados distintos para as mesmas amostras, tornando os valores de referência indefinidos.

Portanto, as repostas do protótipo foram comparadas com os resultados obtidos pelas três medições, para definir como a saída do protótipo se relaciona com cada uma delas. O objetivo foi identificar se o protótipo é capaz de reproduzir os resultados obtidos pelas análises químicas e pelo Satmagan de maneira satisfatória.

7.4.1 Correlação com análises químicas

Foi avaliada a correlação das respostas do protótipo com resultados das análises químicas dos laboratórios de Fábrica e Brucutu. Os teores de FeO medidos pelos laboratórios e as respectivas respostas do protótipo seguem na Tabela 7.5. A tensão de saída considerada corresponde à média das leituras das quatro orientações do compartimento de amostras.

Tabela 7.5: Resultados das análises químicas e respostas do protótipo

Amostra	Fábrica FeO (%)	Brucutu FeO (%)	Tensão (mV)
1	0,57	0,49	62,50
2	0,63	0,58	48,50
3	0,82	0,58	72,00
4	0,86	0,53	82,50
5	0,83	0,50	71,50
6	0,89	0,52	71,25
7	0,66	0,68	84,50
8	0,95	0,50	57,75
9	0,66	0,50	49,25
10	0,28	0,42	39,00

Com as informações apresentadas na Tabela 7.5 foram realizadas análises estatísticas de correlação e de regressão linear simples com o auxílio do programa estatístico Minitab® 16. Foram gerados dois gráficos de linha ajustada, um referente aos resultados do laboratório de Fábrica e outro de Brucutu, representados na Figura 7.3 e na Figura 7.4 respectivamente.

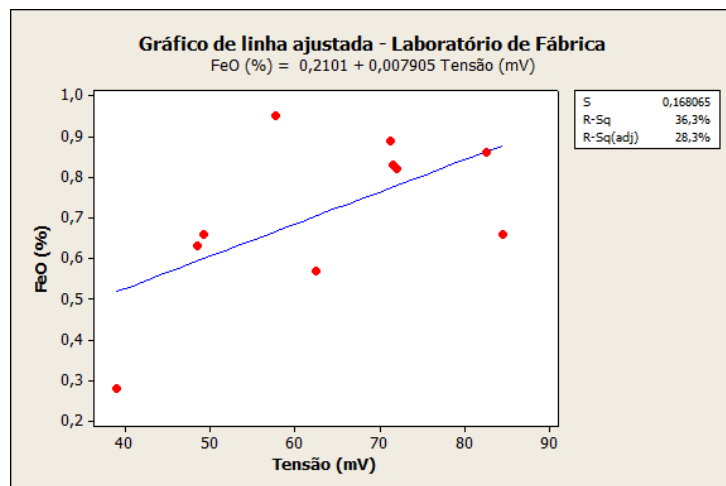


Figura 7.3: Gráfico de linha ajustada para as análises químicas de Fábrica

De acordo com o diagrama de dispersão, não há correlação evidente entre os teores de magnetita medidos e as respostas do protótipo. A análise de correlação forneceu um coeficiente r de 0,602, que indica uma fraca correlação entre as duas variáveis. A análise de regressão forneceu um coeficiente r^2 de 36,3%, o que significa que apenas 36,3% da variável dependente consegue ser explicada pelos regressores presentes no modelo.

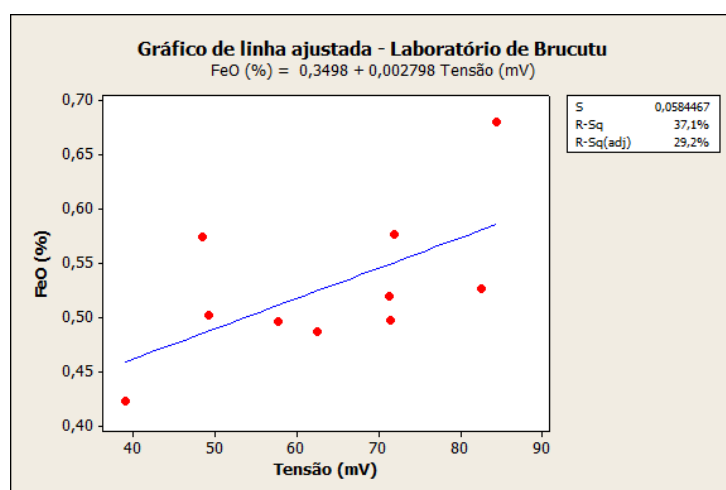


Figura 7.4: Gráfico de linha ajustada para as análises químicas de Brucutu

Para os resultados do laboratório de Brucutu, o diagrama de dispersão também não apresentou nenhum tipo de correlação evidente entre as variáveis. A análise de correlação forneceu um coeficiente r de 0,609, que também indica uma fraca correlação entre as variáveis. A análise de regressão forneceu um coeficiente r^2 de 37,1%, o que significa que apenas 37,1% da variável dependente consegue ser explicada pelos regressores presentes no modelo.

A correlação das respostas do protótipo com os resultados das análises químicas foram fracas. Portanto, o protótipo não apresenta respostas capazes de reproduzir de forma eficaz os resultados das análises químicas.

7.4.2 Correlação com Satmagan

Os resultados obtidos por Satmagan também foram avaliados. Os valores de teores de magnetita medidos pelo Satmagan e as respectivas respostas dos protótipo são apresentadas na Tabela 7.6. Os resultados de Satmagan considerados são referentes à média obtida com as duas medições realizadas em cada amostra.

Tabela 7.6: Resultados de Satmagan e respostas do protótipo

Amostra	Satmagan Magnetita (%)	Leitura (mV)
1	1,62	62,50
2	1,65	48,50
3	1,89	72,00
4	2,10	82,50
5	1,83	71,50
6	1,83	71,25
7	2,57	84,50
8	1,76	57,75
9	1,50	49,25
10	1,15	39,00

As informações apresentadas na tabela foram submetidas às análises estatísticas de correlação e de regressão linear simples. Com o auxílio do programa estatístico Minitab® 16 foi gerado o gráfico de linha ajustada apresentado na Figura 7.5

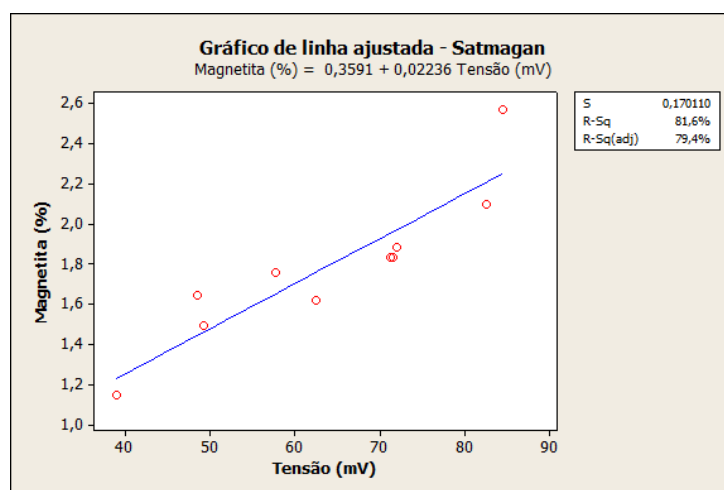


Figura 7.5: Dispersão das leituras do protótipo

De acordo com o diagrama de dispersão, observa-se que existe uma relação com características de linearidade entre as variáveis. A análise de correlação forneceu um coeficiente r de 0,904, que indica uma forte correlação entre as variáveis. A regressão linear simples forneceu um r^2 de 81,6%. Isso significa que 81,6% da variável dependente consegue ser explicada pelos regressores presentes no modelo. Esse resultado foi considerado adequado

para utilização do modelo matemático para estimar o teor de magnetita a partir das respostas do protótipo.

As repostas do protótipo possuem uma forte correlação com os teores de magnetita medidos pelo Satmagan, diferentemente das correlações obtidas por análise química. Portanto, o protótipo é capaz de reproduzir, dentro de uma determinada margem, os resultados do equipamento Satmagan. O modelo matemático que melhor se ajusta aos pontos para estimar o teor de magnetita das amostras de pelotas de minério de ferro é o seguinte:

$$Magnetita(\%) = 0,3591 + 0,02236 \times Tensão(mV). \quad (7.1)$$

É evidente que para obter informações mais confiáveis da regressão linear seriam necessárias um numero maior de amostras. Porém, neste trabalho o procedimento de calibração e as análises estatísticas foram realizadas com as amostras de pelotas de minério de ferro disponíveis.

7.5 Discussão

A calibração do protótipo foi realizada com amostras produzidas no processo de pelotização da usina de Fábrica. Os teores de magnetita das amostras foram medidos por análise química em dois laboratórios diferentes e pelo equipamento Satmagan. Entretanto, as três medições forneceram teores diferentes para as mesmas amostras.

As respostas do protótipo para cada amostra foram comparadas com os teores de magnetita medidos nas análises químicas e pelo Satmagan. Segundo as análises estatísticas realizadas, as respostas do protótipo possuem uma baixa correlação com as medições realizadas nas análise química. Entretanto, quando essa comparação é realizada com as medições por Satmagan, há uma forte correlação entre as variáveis.

Logo, para as condições em que os experimentos foram realizados, o protótipo foi capaz de reproduzir apenas os resultados por Satmagan. Por regressão linear simples, foi obtido modelo matemático que melhor se ajustaram aos pontos para estimar o teor de magnetita nas amostras de pelotas.

Capítulo 8

Conclusões

Nesta dissertação de mestrado foram descritas as etapas de desenvolvimento de um protótipo de um medidor de teor de magnetita em pelotas de minério de ferro. Na primeira fase da pesquisa, foram avaliadas duas metodologias para medição, uma por auto-indutância e outra por indutância mútua. A metodologia por indutância mútua apresentou melhores resultados e foi selecionada como o princípio de funcionamento para construção do protótipo.

Na segunda fase, foram desenvolvidas a estrutura física e o circuito eletrônico do protótipo. Foram utilizadas 10 amostras de pelotas obtidas do processo de pelotização para avaliar as respostas do protótipo. Cada amostra de pelotas teve seu teor de magnetita medido por análise química em dois laboratórios distintos e pelo equipamento Satmagan.

As análises estatísticas das respostas do protótipo para as amostras de pelotas demonstraram que o protótipo proposto possui correlação apenas com os teores medidos pelo equipamento Satmagan. Foi obtido um modelo matemático que permite estimar o teor de magnetita a partir do sinal de saída do protótipo. Dessa forma, o protótipo é capaz de reproduzir os resultados obtidos pela análise por Satmagan com um coeficiente de determinação (r^2) de 81,6%.

Os experimentos e cálculos necessários para estabelecer a precisão e os erros de medição do protótipo não foram abordados nesta dissertação, dado ao pequeno número de amostras disponíveis para calibração e validação do protótipo. Porém, os resultados apresentados na calibração são suficientes para o protótipo, no mínimo, identificar faixas de baixo, médio e alto teor de magnetita nas amostras de pelotas de minério de ferro.

O protótipo desenvolvido é uma solução alternativa às análises por métodos químicos e as outras técnicas e equipamentos convencionais. O procedimento de medição é simples e os resultados são rapidamente obtidos.

Foram elaboradas algumas questões na seção 1.4 que embasaram e motivaram o desenvolvimento desta pesquisa. Essas questões foram respondidas com base nos resultados dos experimentos realizados. As questões com as respectivas respostas são apresentadas abaixo:

Questão 1: Existe correlação entre o teor de magnetita e as propriedades magnéticas das pelotas de minério de ferro ?

Conforme descrito na literatura, a magnetita é um mineral com fortes características magnéticas. As propriedades magnéticas das pelotas são provenientes da presença de magnetita na composição das mesmas. Na seção 5.2 foram demonstrados indícios de que as diferentes forças de atração nas pelotas observadas pela aproximação de um ímã permanente estão relacionados ao teor de magnetita.

Os experimentos com amostras de concentrado de magnetita em tubos, descritos nas sessões 5.3 e 5.4, demonstraram que a indutância em uma bobina e a tensão induzida no secundário em bobinas magneticamente acoplados variaram de forma aproximadamente linear com a quantidade de magnetita nas amostras dos experimentos. Expandindo-se esses resultados para o caso de pelotas, há indícios de uma possível correlação entre o teor de magnetita e as propriedades magnéticas observadas nas pelotas.

Na seção 7.4, foram comparadas as respostas do protótipo com amostras de pelotas de minério de ferro com teores de magnetita conhecidos. Os resultados mostraram uma forte correlação das propriedades magnéticas das pelotas com o teor de magnetita.

Portanto, com base no exposto, pode-se concluir que existe uma alta correlação entre o teor de magnetita e propriedades magnéticas das pelotas de minério de ferro.

Questão 2: Quais métodos podem ser usados para medir o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro por meio de propriedades magnéticas ?

No Capítulo 5 foram testados dois métodos para medir quantidades de concentrado de magnetita em tubos, sendo um método por auto-indutância e um segundo método por indutância mútua. Ambos os métodos foram capazes de estimar as quantidades de magnetita nas amostras. Esse resultado é um indicativo de que os dois métodos podem ser utilizados para medir teores de magnetita em pelotas de minério de ferro.

Os resultados obtidos na calibração do protótipo, descritos na seção 7.4, confirmaram que o método da indutância mútua é capaz de medir o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro por propriedades magnéticas.

Questão 3: É possível medir o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro a partir de propriedades magnéticas e de modo não destrutivo ?

O procedimento de calibração do protótipo, descrito na seção 7.4 demonstrou que é possível estimar o teor de magnetita em pelotas de minério de ferro de forma não destrutiva. Utilizando o princípio da indutância mutua, foi obtido um modelo matemático que estima o teor de magnetita a partir do valor de tensão induzida medida na bobina secundária do protótipo.

8.1 Recomendações de trabalhos futuros

Como trabalhos a serem realizados futuramente, recomenda-se:

- Realizar a calibração do protótipo e as análises estatísticas com um número maior de amostra de pelotas. Um indicação estatística é o uso de pelo menos 40 amostras contendo diferentes teores de magnetita;
- Analisar a influência do diâmetro médio das amostras de pelotas na correlação das medições do protótipo;
- Realizar validação do modelo matemático e descrever a precisão dos resultados;
- Modelar matematicamente o protótipo do medidor e comparar com os resultados empíricos;
- Desenvolver software de interface com o usuário;
- Criar interface de comunicação para troca de dados com sistemas de informações.

Referências Bibliográficas

- BOYLESTAD, R. L. *Introdução à análise de circuitos*. Pearson Education do Brasil, 2012.
- BRITANNICA, E. “Magnetic field”. 2018. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/magnetic-field>>. Acessado em: 27 set. 2018.
- COSTA, G. M. D., RESENDE, V. G. D., TORÍBIO, N. M. “Quantitative phase analysis of iron ore concentrates”, *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 55, n. 4, pp. 263–266, 2002.
- COSTA, R. V. P. D. “Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto.” 2008.
- DEARING, J. “Environmental magnetic susceptibility”, *Using the Bartington MS2 system. Kenilworth, Chi Publ*, 1994.
- DEVICES, A. *Fundamentals of direct digital synthesis (DDS)*. Analog Devices MT-085 Tutorial, 2009.
- DWARAPUDI, S., RAO, S. M. “Prediction of iron ore pellet strength using artificial neural network model”, *ISIJ international*, v. 47, n. 1, pp. 67–72, 2007.
- EISELE, T., KAWATRA, S. “A review of binders in iron ore pelletization”, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 24, n. 1, pp. 1–90, 2003.
- FOGAÇA, J. R. V. “Titulação ácido-base”. 2018. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/titulacao-acido-base.htm>>. Acessado em: 27 set. 2018.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. Vol. 3 (9a. Ed.)*. Grupo Gen - LTC, 2008.
- HALT, J. A. “Factors influencing material loss during iron ore pellet handling”, 2014.
- HILLERICH, J., PETERS, J. *Titration Handbook: Theory and practice of titration*. SI Analytics, 2018.

- ILJANA, M. *Iron ore pellet properties under simulated blast furnace conditions*. Tese de Doutorado, University of Oulu, Finland, 2017.
- INFOMET. “Pelotização”. 2018. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/siderurgia-2a-pelotizacao.php>>. Acessado em: 27 set. 2018.
- LOWRIE, W. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press, 2007.
- MARTIN, R. “Pellet Making Technology–Pelletizing Plants–”. .
- MCROBERTS, M. *Arduino básico*, v. 1. São Paulo: Novatec, 2011.
- MEYER, K. *Pelletizing of Iron Ore*. Springer-Verlag, 1980.
- MORAES, S. L., LIMA, J. R. B. D., RIBEIRO, T. R. “Iron Ore Pelletizing Process: An Overview”. Em: *Iron Ores and Iron Oxide Materials*, IntechOpen, 2018.
- MORAES, S. L., RIBEIRO, T. R. “Brazilian iron ore and production of pellets”, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, pp. 1–8, 2018.
- MORBELLI, B. “Avaliação da dosagem de materiais carbonáceos em pelotas de minério de ferro sobre sua resistência física”, *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 4, n. 1, pp. 6–11, 2017.
- MOURÃO, J., HUERTA, M., DE MEDEIROS, U., et al.. “Guidelines for selecting pellet plant technology”. Em: *6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking-ICSTI, Rio de Janeiro, RJ, Brazil*, pp. 2162–2175, 2012.
- MOURÃO, J. M. *Aspecto conceituais relativos a pelotização de minérios de ferro*. 2017.
- NAVAŘÍK, J. “Mossbauer spectrometers”. 2018. Disponível em: <<https://www.mossbauer-spectrometers.com/inpage/mossbauer-spectrometers-2/>>. Acessado em: 27 set. 2018.
- NAWRATH, M. “Arduino DDS Sinewave Generator”, *Academy of Media Arts Cologne*, 2011. Disponível em: <<http://interface.khm.de/index.php/lab/interfaces-advanced/arduino-dds-sinewave-generator/>>. Acessado em: 27 set. 2018.
- PASSOS, L. A. S. “Modelamento do índice de tamboramento de pelotas de minério de ferro para redução direta”. 2016.
- PIRES, M. J. M. “Espectroscopia Mössbauer: da Física Nuclear à verificação de efeitos relativísticos”, p. 10, 2014.

- PUHLMANN, H. “DSP: Oversampling, Upsampling e Downsampling”, 2015.
- SÁ, K. G. D., COSTA, G. M. D., VIEIRA, C. B. “Efeito da composição mineralógica na resistência à compreensão de pelotas de minério de ferro.” 2004.
- SANDGREN, P., BERGLIND, B., MODIGH, S. “Metso Minerals Handbook: Basics in Minerals Processing”. 2004.
- SCHULER, C. *Eletrônica II - 7ed: Série Tekne*. Tekne. AMGH Editora, 2013.
- SCHULZ, N. F. “Determination of the magnetic separation characteristics with the Davis Magnetic Tube”, *Trans. SME-AIME*, v. 229, pp. 211–216, 1964.
- SEDRA, A. S., SMITH, K. C. *Microelectronic circuits*, v. 1. New York: Oxford University Press, 1998.
- SEPOR. “Davis Tube Tester”. 2018. Disponível em: <<https://www.sepor.com/davis-tube-tester/>>. Acessado em: 27 set. 2018.
- SHANDLEY, P., BACON, L. “Analysis for magnetite utilizing magnetic susceptibility”, *Geophysics*, v. 31, n. 2, pp. 398–409, 1966.
- SIMÕES, H. D. O., BAILON, A. M. G., DA SILVA, R. R. A., et al.. “Avaliação da influência das trincas no índice de permeabilidade magnética das pelotas para definição de novo método de medição do FeO. In: Seminário de redução de minério de ferro e matérias-primas”, 2014.
- SOUZA, P. A. “Relatório interno VALE - Equipamento para medição de magnetita em pelotas de minério de ferro”. 2006.
- STMICROELECTRONICS. “TDA7294 100V - 100W DMOS AUDIO AMPLIFIER WITH MUTE/ST-BY”. 2003.
- SYSTEMS, R. *Manual Satmagan 135*, 2013. Rev.5.00.
- UMADEVI, T., LOBO, N. F., DESAI, S., et al.. “Optimization of firing temperature for hematite pellets”, *ISIJ international*, v. 53, n. 9, pp. 1673–1682, 2013.
- WALTER, K. E. “Apparatus utilizing an air core transformer for determining magnetic material content of a substance”. ago. 22 1972. US Patent 3,686,563.
- ZHU, D., PAN, J., LU, L., et al.. “Iron ore pelletization”. Em: *Iron Ore*, Elsevier, pp. 435–473, 2015.

Apêndice A

Anexos

A.1 Publicações

Durante o desenvolvimento da pesquisa, os seguintes trabalhos foram publicados em congressos:

- “Aplicação de simuladores dinâmicos ao treinamento de profissionais de controle nos processos de beneficiamento mineral” no XLIV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE 2016).
- “Overview of the magnetite content analyzers in iron ore pellets”, no Aachen International Mining Symposia (AIMS 2018) – Mines of the future, Alemanha.
- “Development of a Magnetite Content Analyzer for Iron Ore Pellets based on Magnetic Properties” no 6th International Congress on Automation in Mining (Automining 2018), Chile.

A.2 Código fonte do algoritmo embarcado no microcontrolador

Nesta sessão segue o código fonte do algoritmo embarcado no microcontrolador para geração de onda senoidal e leitura do sinal de saída em corrente contínua do protótipo.

```
1  /*
2  * PROTOTIPO DO ANALISADOR DE MAGNETITA
3  * Gerador de onda senoidal (DDS)
4  * Leitura de tensao em corrente continua (Oversampling e media movel)
5  */
6
7  #include "avr/pgmspace.h"
8  #include <eRCaGuy_NewAnalogRead.h>
9
10 // table of 256 sine values / one sine period / stored in flash memory
11 const byte sine256[] PROGMEM = {
12 127,130,133,136,139,143,146,149,152,155,158,161,164,167,170,173,176,178,
13 181,184,187,190,192,195,198,200,203,205,208,210,212,215,217,219,221,223,
14 225,227,229,231,233,234,236,238,239,240,242,243,244,245,247,248,249,249,
15 250,251,252,252,253,253,253,254,254,254,254,254,254,254,253,253,253,252,
16 252,251,250,249,249,248,247,245,244,243,242,240,239,238,236,234,233,231,
17 229,227,225,223,221,219,217,215,212,210,208,205,203,200,198,195,192,190,
18 187,184,181,178,176,173,170,167,164,161,158,155,152,149,146,143,139,136,
19 133,130,127,124,121,118,115,111,108,105,102,99,96,93,90,87,84,81,78,76,73,
20 70,67,64,62,59,56,54,51,49,46,44,42,39,37,35,33,31,29,27,25,23,21,20,18,16,
21 15,14,12,11,10,9,7,6,5,5,4,3,2,2,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,2,2,3,4,5,5,6,7,
22 9,10,11,12,14,15,16,18,20,21,23,25,27,29,31,33,35,37,39,42,44,46,49,51,54,
23 56,59,62,64,67,70,73,76,78,81,84,87,90,93,96,99,102,105,108,111,115,118,
24 121,124
25 };
26 #define cbi(sfr , bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
27 #define sbi(sfr , bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
28
29 int ledPin = 13;           // LED pin 7
30 int testPin = 7;
31 int t2Pin = 6;
32 byte bb;
33
34 double dfreq;
35 int recebe;
36 byte byteRead;
37 long i=0;
38
39 int leitura;
40 float tensao;
41
```

```

42 // const double refclk=31372.549; // =16MHz / 510
43 const double refclk=31376.6; // measured
44
45 // variables used inside interrupt service declared as volatile
46 volatile byte icnt; // var inside interrupt
47 volatile byte icnt1; // var inside interrupt
48 volatile byte c4ms; // counter incremented all 4ms
49 volatile unsigned long phaccu; // pahse accumulator
50 volatile unsigned long tword_m; // dds tuning word m
51
52
53 // Configuracoes Sampling ADC
54 //Variaveis globais
55 byte pin = A0;
56 byte bitsOfResolution = 12; //commanded oversampled resolution
57 unsigned long numSamplesToAvg = 1; //number of samples AT THE OVERSAMPLED
    RESOLUTION that you want to take and average
58 ADC_prescaler_t ADCSpeed = ADC.FAST;
59
60
61 //Filtro digital (media movel)
62 #define NUMREADINGS 100
63 int readings[NUMREADINGS]; // qtde de amostras
64 int index = 0; // indice da leitura atual
65 float total = 0; // total movel
66 float average = 0; // media
67
68
69 void setup()
70 {
71     pinMode(ledPin , OUTPUT); // sets the digital pin as output
72     Serial.begin(9600); // connect to the serial port
73     Serial.println("DDS Test");
74
75     pinMode(6, OUTPUT); // sets the digital pin as output
76     pinMode(7, OUTPUT); // sets the digital pin as output
77     pinMode(10, OUTPUT); // pin10= PWM output / frequency output
78
79     Setup_timer2();
80
81     // disable interrupts to avoid timing distortion
82     // cbi (TIMSK0,TOIE0); // disable Timer0 !!! delay() is now
        not available
83     sbi (TIMSK2,TOIE2); // enable Timer2 Interrupt
84
85     dfreq=1000.0; // initial output frequency = 1000.o Hz
86     tword_m=pow(2,32)*dfreq/refclk; // calulate DDS new tuning word

```

```

87
88 //Configuracoes Oversampling
89 //Configure the adc how you want it
90 adc.setADCSpeed(ADCSpeed);
91 adc.setBitsOfResolution(bitsOfResolution);
92 adc.setNumSamplesToAvg(numSamplesToAvg);
93
94 // leitura de tensao (media movel)
95 for (int i = 0; i < NUMREADINGS; i++){
96     readings[i] = 0; // inicializa todas as leituras
97     com 0
98 }
99 }
100 void loop()
101 {
102     while(1) {
103
104         if (Serial.available())
105         {
106             dfreq=Serial.readString().toInt();
107         }
108
109         if (c4ms > 250) { // timer / wait fou a full second
110             c4ms=0;
111
112             cbi (TIMSK2,TOIE2); // disble Timer2 Interrupt
113             tword_m=pow(2,32)*dfreq/refclk; // calulate DDS new tuning word
114             sbi (TIMSK2,TOIE2); // enable Timer2 Interrupt
115
116             Serial.print("Freq:");
117             Serial.print(dfreq);
118             Serial.print(" ");
119             Serial.print("Analogico:");
120             Serial.print(readings[index]);
121             Serial.print(" ");
122             Serial.print("Tensao:");
123             Serial.print(tensao,4);
124             Serial.print(" ");
125             Serial.print("Analogico_MAX:");
126             Serial.println(adc.getMaxPossibleReading());
127         }
128
129         total -= readings[index]; // subtrair a ultima leitura
130         readings[index] = adc.newAnalogRead(pin); // ler do sensor
131         //Serial.println(readings[index]);
132         total += readings[index]; // adicionar leitura ao total

```

```

133     index = (index + 1);                // avançar ao proximo indice
134
135     if (index >= NUMREADINGS){          // se estiver no fim do vetor
136         ...
137         index = 0;                      // ...meia-volta ao inicio
138     }
139
140     average = total / NUMREADINGS;      // calcular a media
141     tensao = average * (5 / 4092.0);
142
143     sbi(PORTD,6); // Test / set PORTD,7 high to observe timing with a scope
144     cbi(PORTD,6); // Test /reset PORTD,7 high to observe timing with a scope
145 }
146 // *****
147 // timer2 setup
148 // set prscaler to 1, PWM mode to phase correct PWM, 16000000/510 =
149 // 31372.55 Hz clock
150 void Setup_timer2() {
151     // Timer2 Clock Prescaler to : 1
152     sbi (TCCR2B, CS20);
153     cbi (TCCR2B, CS21);
154     cbi (TCCR2B, CS22);
155
156     // Timer2 PWM Mode set to Phase Correct PWM
157     cbi (TCCR2A, COM2A0); // clear Compare Match
158     sbi (TCCR2A, COM2A1);
159
160     sbi (TCCR2A, WGM20); // Mode 1 / Phase Correct PWM
161     cbi (TCCR2A, WGM21);
162     cbi (TCCR2B, WGM22);
163 }
164
165 // *****
166 // Timer2 Interrupt Service at 31372,550 KHz = 32uSec
167 // this is the timebase REFCLOCK for the DDS generator
168 // FOUT = (M (REFCLK)) / (2 exp 32)
169 // runtime : 8 microseconds ( inclusive push and pop)
170 ISR(TIMER2_OVF_vect) {
171
172     sbi(PORTD,7); // Test / set PORTD,7 high to observe timing with
173     // a oscope
174
175     phaccu=phaccu+tword_m; // soft DDS, phase accu with 32 bits
176     icnt=phaccu >> 24; // use upper 8 bits for phase accu as frequency
177     // information

```

```

176                                     // read value from ROM sine table and send to PWM
    DAC
177 OCR2A=pgm_read_byte_near(sine256 + icnt);
178
179 if(icnt1++ == 125) { // increment variable c4ms all 4 milliseconds
180     c4ms++;
181     icnt1=0;
182 }
183
184 cbi(PORTD,7); // reset PORTD,7
185 }

```