



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**

Dissertação

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BANCADA PARA MEDIÇÃO
DE UMIDADE DE MINÉRIOS**

Vinícius Nunes Lage

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2018**

Vinícius Nunes Lage

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BANCADA PARA MEDIÇÃO
DE UMIDADE DE MINÉRIOS**

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.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo

Coorientador: Prof. Sávio Augusto Lopes da Silva

Prof. Paulo de Marcos Barros Monteiro

Ouro Preto

2018

L174d

Lage, Vinícius Nunes.

Desenvolvimento de sistema de bancada para medição de umidade de minérios [manuscrito] / Vinícius Nunes Lage. - 2018.

139f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.

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.

1. Sensor de umidade. 2. Minérios de ferro - Umidade.. 3. Constante dielétrica. I. Segundo, Alan Kardek Rêgo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

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


Desenvolvimento de Sistema de Bancada para Medição de Umidade de
Minérios

Vinícius Nunes Lage

Dissertação defendida e aprovada em 24 de maio de 2018 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



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




D.Sc. Paulo Marcos de Barros Monteiro
Coorientador – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



Ph.D. Andre Luiz Amarante Mesquita
Membro externo – Universidade Federal do Pará (ITV)



D.Sc. Paulo Raimundo Pinto
Membro externo – Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)



Ph.D. Carlos de Figueiredo Gontijo
Membro externo – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu agradeço à minha família pelo apoio incondicional que sempre recebi deles. À minha mãe Rita, a pessoa mais importante pra mim nessa vida, um ser iluminado e brilhante que esse mundo recebeu. Às minhas irmãs Nara e Nádia, pelo apoio e incentivo constante, às vezes acreditando mais em mim do que eu mesmo. À Luísa, minha sobrinha linda que enche os nossos corações de alegria e ao seu pai incrível, Daniel. Ao meu pai que, sem dúvidas, está muito orgulhoso e tomando conta de nós. À minha família, meu agradecimento em primeiro lugar sempre.

Gostaria de agradecer ao CEFET-OP, hoje IFMG que me proporcionou iniciar na automação, de onde nunca mais saí. À UFOP que pela infraestrutura e oportunidade de fazer uma graduação e cursar um mestrado. Ao ITV e à VALE que acreditaram e fizeram este projeto grandioso ser possível. À Fundação Gorceix, em especial ao Renato e ao Luciano, que nos prestaram um imenso apoio. A todos os meus colegas e professores, em especial ao Prof. Dr. Paulo Monteiro, ao Prof. Dr. Sávio, ao Prof. Dr. Agnaldo, ao Prof. Dr. Laurindo e ao Pedrão, que com algumas respostas que parecem simples, mudaram o rumo deste projeto ou esclareceram pontos importantíssimos. Aos meus colegas engenheiros da thyssenkrupp, que me prestaram apoio a todo momento para finalizar esse projeto. À CAPES pelo apoio financeiro essencial para a dedicação ao trabalho.

Porém o meu agradecimento especial vai para as pessoas que de fato fizeram com que este trabalho fosse possível, que se dedicaram inteiramente a abraçaram o projeto de uma maneira única: Carina, Erica, Higor, Marcelo, Thomás, Yan, Guilherme e claro meu professor e orientador Prof. Dr. Alan Kardek. Vocês que dedicaram a este projeto uma energia imensurável e que fizeram dele um projeto seus e, graças a esse esforço, ele foi possível, e com a grandiosidade que foi. Esta dissertação não é minha, é nossa. Muito obrigado! Contem comigo sempre.

“Prefiro a incerteza do saber
À certeza do não saber”.

RESUMO

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.)

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BANCADA PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE DE MINÉRIOS

Vinícius Nunes Lage

Maio/2018

Orientadores: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo

Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

A umidade de materiais é um parâmetro muito utilizado para o controle de diversos processos industriais. Em especial na mineração, essa variável tem importância fundamental nas etapas de transporte e manuseio, representando grande parte dos gastos na produção de minérios. A maioria das empresas utilizam métodos convencionais de laboratório para determinar a umidade dos minérios, o que torna a medição muito trabalhosa e lenta para a finalidade de controle de processos. Este projeto propõe o desenvolvimento de um sistema de bancada de baixo custo para medição de umidade de minérios que forneça o resultado em tempo real, com o objetivo de otimizar os processos de mineração. O sensor consiste em um sistema de medição portátil de bancada, formados por um par de eletrodos de metal galvanizado, dispostos em uma caixa de acrílico. O equipamento pode ser utilizado em situações nas quais não é necessária a medição online, mas apenas em análise de amostras retiradas do processo, como no caso da triagem de minério antes da pelotização. Diferentemente de outros sistemas de medição existentes, o sistema proposto utiliza circuito de ponte autobalanceada como método de medição, apresentando baixo custo, alta precisão, alta relação sinal/ruído, resposta rápida e imunidade a capacitâncias parasitas. Foi desenvolvido um modelo matemático exclusivo em que relaciona a resposta do sensor com a umidade, o teor de ferro, a densidade aparente e a granulometria do minério.

Palavras-chave: sensor de umidade, umidade de minério de ferro, constante dielétrica.

ABSTRACT

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.)

DEVELOPMENT OF BENCH SYSTEM FOR MOISTURE MEASUREMENT IN ORES

Vinícius Nunes Lage

May/2018

Advisors: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo
Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva
Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Moisture content of materials is a parameter widely used for the control of several industrial processes. Especially in mining, this variable has a fundamental importance in the transport and handling stages, which represent the majority of the expenses for the production of ores. Most companies use conventional laboratory methods to determine the moisture content of ores, which make the measurement too laborious and slow for the purpose of process control. This project proposes the development of a low-cost bench system for ore moisture measurement which provides the results in real time, with the aim of optimizing the mining processes. The sensor consists of a portable benchtop measuring system, formed by a pair of galvanized metal electrodes, arranged in an acrylic case. The equipment can be used in situations where online measurement is not necessary, but only in the analysis of samples taken from the process, as in the case of ore sorting before pelletizing. Differently from other existing measurement systems, the proposed system will use a self-balanced bridge circuit as a measurement method, presenting low cost, high accuracy, high signal-to-noise ratio, fast response and immunity to parasitic capacitances. A unique mathematical model was developed that relates the sensor response to moisture, iron content, apparent density of ore and grain size.

Keywords: moisture sensor, iron ore moisture, dielectric constant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito básico sobre o fluxo de água em contato com as partículas do solo e suas respectivas forças capilares. Fonte: BRIGGS, 1897.	18
Figura 2 – Partículas de solo e suas interações com diferentes tipos de umidade de acordo com a profundidade. Fonte: MOLINA, 2017.	19
Figura 3 – Distribuição de umidade para diferentes compactações do solo. Fonte: MOLINA, 2017.	20
Figura 4 – Exemplo de TDR comercializado pela Enviromonitors (a) e esquemático de um TDR. Fonte: “TDR100 SOIL MOISTURE METER”, 2018 e LEKSHMI <i>et al</i> 2014 (b).	24
Figura 5 – Sensor de impedância. Fonte: LEKSHMI <i>et al</i> 2014.	25
Figura 6 – (a) Sensor capacitivo e (b) FDR. Fonte: LEKSHMI <i>et al</i> 2014.	27
Figura 7 – Representação da impedância e admitância complexas, em coordenadas polares para definição da resistência, condutância, reatância e susceptância. Fonte: SILVA, 2008.	30
Figura 8 – Célula de medição. Fonte: SILVA, 2008.	32
Figura 9 – Representação em circuito eletrônico da célula. Fonte: AGILENT, 2005.	32
Figura 10 – Molécula polar de água H ₂ O e molécula apolar de trifluoreno de boro BF ₃ . Fonte: GENTILINI, 2012.	34
Figura 11 – Torque resultante devido a presença de um campo elétrico que rotaciona uma molécula polar. Fonte: AGILENT, 2005.	35
Figura 12 – Comportamento do dielétrico para diferentes frequências. Fonte: AGILENT, 2005.	36
Figura 13 – Permissividade da água a 30 °C no domínio da frequência. Fonte: AGILENT, 2005.	38
Figura 14 – Método com circuito simples de medição de impedância. (a) Princípio básico e (b) circuito prático mais utilizado. Fonte: SILVA, 2008.	40
Figura 15 – Circuito em ponte para medição da impedância. Fonte: SILVA, 2008.	41
Figura 16 – Circuito RLC série (a) e RLC paralelo (b) para medição de impedância. Fonte: SILVA, 2008.	42

Figura 17 – (a) Ponte autobalanceada simples e (b) circuito prático utilizado. Fonte: SILVA, 2008.....	44
Figura 18 – Resposta em frequência do ganho da ponte autobalanceada. Fonte: SILVA, 2008.....	45
Figura 19 – Resposta em frequência simplificada do circuito. Fonte: SILVA, 2008.....	46
Figura 20 – Ponte autobalanceada com a célula de prova. Fonte: SILVA, 2008.....	47
Figura 21 – Resposta em frequência para diferente substâncias. Fonte: SILVA, 2008.	47
Figura 22 – Projeto do primeiro protótipo.....	49
Figura 23 – Projeto do segundo protótipo.	50
Figura 24 – Diagrama funcional do sistema.....	51
Figura 25 – Resposta em frequência do circuito mostrando as frequências de corte.....	54
Figura 26 – Amostra sendo completamente saturada.....	57
Figura 27 – (a) Estufa programada; e (b) amostra na balança desenvolvida.....	58
Figura 28 – Processo de elaboração das amostras.....	60
Figura 29 – (a) Primeiro protótipo desenvolvido vazio e (b) com amostra de minério inserida.	65
Figura 30 – Segundo protótipo desenvolvido.....	66
Figura 31 – Segundo protótipo desenvolvido com a prensa mecânica, célula de carga e o circuito de processamento.....	66
Figura 32 – Simulação para a varredura de frequência.	67
Figura 33 – Simulação para a varredura de frequência com novos valores.	67
Figura 34 – PCB desenvolvida no software ARES.....	68
Figura 35 – Elaboração da PCB utilizando a CNC.	69
Figura 36 – Circuitos desenvolvidos.	69
Figura 37 – Software supervisor.....	70
Figura 38 – Resposta em frequência real do circuito.	71
Figura 39 – Relação entre a constante dielétrica relativa e o ganho do circuito de medição... ..	72

Figura 40 – Calibração da balança desenvolvida.	73
Figura 41 – Variação da constante dielétrica ao longo tempo utilizando a estufa.	73
Figura 42 – Grande variação no resultado devido à influência da temperatura e à imprecisão da célula de carga.	74
Figura 43 – Variação da massa ao longo do tempo durante o experimento na estufa.....	74
Figura 44 – Modelo de correlação no ensaio com a estufa.	75
Figura 45 – Amostras preparadas com umidade conhecida (a) e amostras secando na estufa pelo método padrão antes do preparo (b).	76
Figura 46 – Correlação entre a constante dielétrica relativa e a umidade do minério.....	77
Figura 47 – Gráfico de erros do segundo experimento.	78
Figura 48 – Modelo correlacionando o a resposta do sensor em ganho e a constante dielétrica.	80
Figura 49 – Modelo matemático para o valor médio entre as compactações para a amostra 6.	81
Figura 50 – Influência das diferentes compactações para na amostra 6.....	82
Figura 51 – Influência das diferentes compactações para na amostra 7.....	82
Figura 52 – Influência das diferentes compactações para na amostra 11.....	83
Figura 53 – Influência das diferentes compactações para na amostra 13.....	83
Figura 54 – Influência das diferentes compactações para na amostra 15.....	84
Figura 55 – Influência das diferentes compactações para na amostra 19.....	84
Figura 56 – Influência da densidade aparente na amostra 6.....	86
Figura 57 – Influência da densidade aparente na amostra 7.....	86
Figura 58 – Influência da densidade aparente na amostra 11.....	87
Figura 59 – Influência da densidade aparente na amostra 13.....	87
Figura 60 – Influência da densidade aparente na amostra 15.....	88
Figura 61 – Influência da densidade aparente na amostra 19.....	88

Figura 62 – Gráfico empírico relacionando a resposta do sensor em ganho com a umidade, e a densidade aparente de todas as mostras.....	89
Figura 63 – Modelos do sensor para diferentes teores de ferro.....	90
Figura 64 – Influência do teor de ferro para amostras com teores mais próximas.....	91
Figura 65 – Influência do teor de ferro nas amostras.....	92
Figura 66 – Gráfico empírico de superfície relacionando a resposta em ganho do sensor com a umidade e o teor de ferro.....	92
Figura 67 – Modelo relacionando a resposta do sensor com o teor de ferro.....	93
Figura 68 – Resposta do sensor em função do teor de ferro, da densidade aparente e da umidade.....	95
Figura 69 – Umidade em função da resposta do sensor em ganho, do teor de ferro e da densidade aparente.....	96
Figura 70 – Gráfico de erro para a amostra 6.....	98
Figura 71 – Gráfico de erro para a amostra 7.....	99
Figura 72 – Gráfico de erro para a amostra 11.....	99
Figura 73 – Gráfico de erro para a amostra 13.....	100
Figura 74 – Gráfico de erro para a amostra 15.....	101
Figura 75 – Gráfico de erro para a amostra 19.....	101
Figura 76 – Gráficos dos erros para a amostra 6 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).....	102
Figura 77 – Gráficos dos erros para a amostra 7 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).....	103
Figura 78 – Gráficos dos erros para a amostra 13 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).....	103
Figura 79 – Gráficos dos erros para a amostra 15 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).....	103
Figura 80 – Gráficos dos erros para a amostra 19 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).....	104

Figura 81 – Gráfico de erros para a amostra 11.	104
Figura 82 – Variação do coeficiente angular das retas dos gráficos de umidade em função da densidade aparente.....	105
Figura 83 – Variação dos novos coeficientes angulares.....	105
Figura 84 – Variação dos novos coeficientes angulares considerando a amostra 11 com 57% de ferro.	106
Figura 85 – Gráfico de erros para a amostra 11 considerando-a com 57% de teor de ferro. .	106
Figura 86 – Gráfico dos erros médios e desvios.....	107
Figura 87 – Gráfico dos erros médios e desvios, considerando a granulometria.	107
Figura 88 – Gráfico de erros para o teor de Fe.	109
Figura 89 – Foto de um equipamento em campo. Fonte: ZERIZGHY <i>et al</i> , 2013.	119
Figura 90 – Esquemático do sensor por raio gama. Fonte: VÁRALLYAY, 2003.	120
Figura 91 – Equipamento do tipo GPR em campo. Fonte: SANTOS, 2013.	121
Figura 92 – Chip de um sistema micro mecânico – MEMS. Fonte: adaptado de JACKSON <i>et al.</i> , 2008.	122
Figura 93 – Vista da viga micromecânica presente nos sensores tipo MEMS. Fonte: adaptado de JACKSON <i>et al.</i> , 2008.	122
Figura 94 – Sensor de matriz granular. Fonte: RÊGO SEGUNDO, 2014.	123
Figura 95 – Sensor que utiliza a técnica de dissipação de calor. Fonte: Adafruit, 2018.	125
Figura 96 – Esquemático de um tensiômetro (a) equipamento em campo (b). Fonte: RÊGO SEGUNDO, 2014.	126
Figura 97 – Sensor óptico utilizado no setor agrônomo. Fonte: Mouser Eletronics, 2018 ...	127
Figura 98 – Esquemático mostrando o princípio de funcionamento do sensor por fibra óptica. Fonte: Materials Today, 2018.....	127
Figura 99 – Sensor de umidade que utiliza o método de infravermelho. Fonte: JWII, 2018.....	128
Figura 100 – Sensor instalado na correia transportadora onde as antenas de transmissão e recepção estão no mesmo plano. Fonte: MCGOWN, 2009.	130

Figura 101 – Sensor do tipo micro-ondas onde o material se encontra entre as antenas. Fonte: TRABELSI *et al*, 2016. 130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Permissividade elétrica relativa de alguns materiais da natureza	28
Tabela 2 – relação entre impedância, admitância e permissividade considerando a capacitância à vazio de uma célula de medição no domínio da frequência	33
Tabela 3 - Constantes dielétricas relativas das amostras utilizadas no experimento.....	53
Tabela 4 – Amostras Caracterizadas	62
Tabela 5 – Termos encontrados para cada amostra para um modelo de terceira ordem.....	85
Tabela 6 – Maiores desvios padrões encontrados por amostra	97
Tabela 7 – Devios padrões dos erros para cada unidade na validação	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	UMIDADE EM MEIO POROSO E MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	18
2.1	Umidade em meio poroso	18
2.2	Estado da arte e medição de umidade em meio poroso	20
2.3	Métodos clássicos de medição de umidade	21
2.4	Métodos modernos de medição de umidade.....	22
2.5	Dielétrico	22
2.5.1	Reflectometria no domínio do tempo (TDR)	23
2.5.2	Reflectometria no domínio da amplitude (ADR) ou sensor de impedância.....	25
2.5.3	Método capacitivo e reflectometria no domínio da frequência (FDR).....	26
3	MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE MEIOS POROSOS.....	27
3.1	Propriedades Elétricas do Meio Poroso	27
3.2	Impedância e Permissividade Complexa	28
3.3	Comportamento do Dielétrico	33
3.4	Técnicas de medição de impedância e a ponte autobalanceada.....	39
3.4.1	Circuitos para medição em baixa frequência.....	39
4	CIRCUITO BASEADO EM PONTE AUTOBALANCEADA PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE	43
5	MATERIAIS E MÉTODOS	48
5.1	Desenvolvimento dos protótipos	49
5.2	Características importantes para desenvolvimento do protótipo	51
5.3	Desenvolvimento do hardware	51
5.4	Desenvolvimento do firmware e do software supervisorio	54
5.5	Experimento I	56

5.5.1	Calibração do sensor.....	56
5.5.2	Calibração da célula de carga	57
5.5.3	Saturação da amostra e secagem do minério	57
5.6	Experimento II	59
5.6.1	Elaboração das amostras com diferentes umidades.....	59
5.6.2	Inserção das amostras no sensor	60
5.6.3	Validação do modelo	60
5.7	Experimento III.....	61
5.7.1	Elaboração das amostras com diferentes umidades, ferro e granulometria.....	61
5.7.2	Inserção das amostras no sensor	62
5.7.3	Validação do modelo	64
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
6.1	Os protótipos.....	65
6.2	O hardware.....	67
6.3	O firmware e o software supervisorio.....	69
6.4	Experimento I	70
6.4.1	Calibração do sensor.....	70
6.4.2	Calibração da célula de carga	72
6.4.3	Secagem do minério	73
6.5	Experimento II	76
6.5.1	Elaboração das amostras.....	76
6.5.2	Inserção das amostras no sensor	77
6.5.3	Validação do modelo	77
6.6	Experimento III.....	78
6.6.1	Elaboração das amostras.....	78
6.6.2	Inserção das amostras no sensor	79

6.6.3	Calibração do sensor.....	80
6.6.4	Influência da densidade aparente.....	85
6.6.5	Influência do teor de ferro	90
6.6.6	Modelo geral desenvolvido	94
6.6.7	Validação dos modelos.....	97
7	CONCLUSÃO.....	109
8	TRABALHOS FUTUROS E RECOMENDAÇÕES.....	111
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
1	APÊNDICE A – Métodos de Medição de Umidade.....	118
1.1	Dispersão de nêutrons (NMM)	118
1.2	Atenuação gama.....	119
1.3	Radar por penetração no solo (GPR)	120
1.4	Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)	121
1.5	Resistividade	123
1.6	Dissipação térmica e fluxo de calor	124
1.7	Tensiômetro	125
1.8	Ópticos.....	126
1.8.1	Técnica utilizando luz polarizada	126
1.8.2	Técnica utilizando fibra óptica	127
1.9	Sensor de infravermelho	128
1.10	Micro-ondas	129
2	APÊNDICE B – Dados dos Experimentos para Calibração.....	131
3	APÊNDICE C – Dados dos Experimentos para a Validação	134

1 INTRODUÇÃO

Só no ano de 2017, foram embarcadas 211 milhões de toneladas métricas de minério de ferro e pelotas pela Vale, um total de 61% do total de venda de minério e pelotas da companhia (VALE, 2018). Esse grande volume foi o que saiu do Brasil com destino para outros países, porém 100% do minério e pelotas passam por processos de transporte internos, seja dentro da companhia ou entre cidades e estados dentro do Brasil. Em todos eles, existe um fator que encarece muito os custos e não agrega nenhum valor ao produto final: a água.

O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo e se destaca pela alta qualidade do seu minério. Porém, a alta competitividade no mercado força as empresas a investirem em tecnologias que diminuam o custo de produção, bem como aumentem a qualidade e o valor agregado do minério (MOREIRA, 2008).

Nesse sentido, a umidade do minério é uma característica muito importante e deve ser controlada, pois afeta diretamente o custo da produção. Os processos de beneficiamento, por exemplo, muitas vezes utilizam água e, conseqüentemente, aumentam a umidade do minério. A falta de controle ou a ineficácia no processo de secagem pode onerar o valor do produto, comprometer a estabilidade das pilhas nos pátios de estocagem, encarecer o transporte, entre diversos outros problemas.

Dependendo do tipo de minério, umidades em torno de 9% já são consideradas altas, podendo comprometer o processo de estocagem e encarecer consideravelmente o transporte. A dimensão desse problema fica ainda mais destacada quando se considera o alto volume de produção de minério de ferro no Brasil, que exporta milhões de toneladas por ano (ABRÃO; MARINHO, 2005; FERREIRA, 2009).

No Brasil, o método da estufa foi selecionado como padrão para medição de umidade (ABNT, 2016) garantindo uma padronização nos resultados obtidos em diferentes laboratórios, porém, o método pode demorar mais de 24 h. Normalmente no setor mineral dura cerca de 2 a 3 horas, o que ainda assim é um tempo longo.

Neste trabalho busca-se estudar, modelar matematicamente e desenvolver um sistema de medição baseado no método capacitivo utilizando-se o circuito de ponte autobalanceada para fazer a medição da umidade em tempo real para minérios de ferro.

2 UMIDADE EM MEIO POROSO E MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Neste capítulo serão abordados tópicos que explicam de forma detalhada as interações entre as partículas do meio poroso com a água, as diferentes formas em que a umidade é encontrada no meio poroso, bem como diferentes métodos para medir a quantidade de água presente no meio. Foram selecionados os métodos mais utilizados na atualidade e um comparativo entre eles foi realizado, enfatizando os custos, precisão e o tempo de resposta.

2.1 Umidade em meio poroso

As interações entre um meio poroso e a água se apresentam em três formas distintas, sendo elas gravitacional, capilar e higroscópica (BRIGGS, 1897; KARL TERZAGHI, 1943). A Figura 1 mostra um diagrama com a interação entre partículas de solo, água e seu movimento devido às forças capilares presentes entre as partículas, a água e o ar.

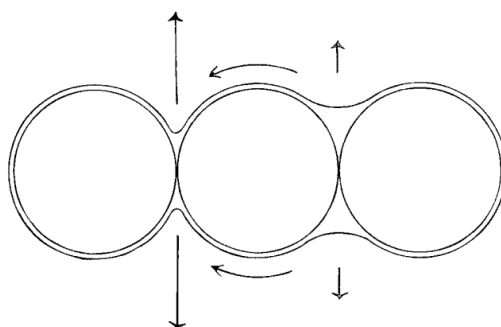


Figura 1 – Conceito básico sobre o fluxo de água em contato com as partículas do solo e suas respectivas forças capilares.

Fonte: BRIGGS, 1897.

A umidade gravitacional, como o próprio nome diz, é a forma em que a água se move livremente no meio poroso devido à força gravitacional. A água se estabiliza nos grandes poros do meio e seu movimento é bem rápido em solos bem drenados. Normalmente a umidade gravitacional do solo é drenada em 2 ou 3 dias após a precipitação. A umidade capilar está presente nos microporos do meio, e é mantida ali devido à coesão e à adesão contra a força gravitacional.

Já a umidade higroscópica se forma por meio de uma finíssima camada de água em volta da superfície das partículas do meio poroso (não está presente nos poros, mas adsorvida na superfície das partículas) e, devido às forças extremamente fortes de adesão, são muito difíceis de serem removidas. Por exemplo, a argila retém mais umidade higroscópica do que a areia, devido à sua maior área superficial e mais água capilar, devido aos menores raios efetivos dos seus capilares. Vários estudos foram realizados para entender melhor os diferentes tipos de umidade em meios porosos, como qual a quantidade de umidade capilar fica disponível para as plantas após o excesso de água retida no solo ser a drenada gravitacionalmente (J.A. WIDTSOE, 1912), ou ainda a quantidade de água que é retida no meio poroso de acordo com a curva característica da água no solo (ou curva de retenção de umidade), que é uma relação entre a capacidade de sucção do meio e é única para cada tipo de solo (BUCKINGHAM, 1907; GARDNER, 1920).

A análise da quantidade de água retida nos solos, requer estudos exaustivos, já que está relacionada a diferentes fatores como o tamanho das partículas distribuídas no meio, estrutura do solo, porosidade, área de superfície, profundidade do solo, composição mineralógica, grau de compactação, presença de contaminantes, conteúdo orgânico, temperatura entre outros (LETEY, 1985; H.Y. FANG, 2006; N. WAGNER, 2009). Na Figura 2 mostra-se uma representação esquemática de um solo com os diferentes tipos de umidade para diferentes profundidades, assim como na Figura 3 mostram-se as diferentes distribuições de umidade de acordo como a compactação do solo.

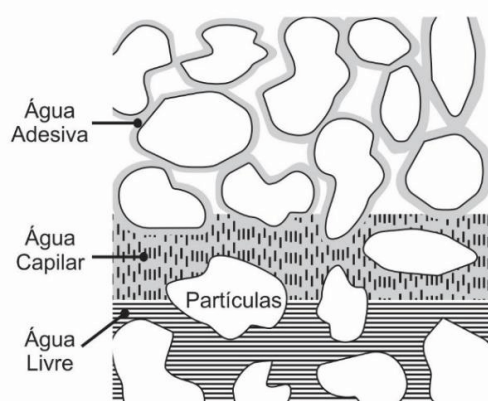


Figura 2 – Partículas de solo e suas interações com diferentes tipos de umidade de acordo com a profundidade.

Fonte: MOLINA, 2017.

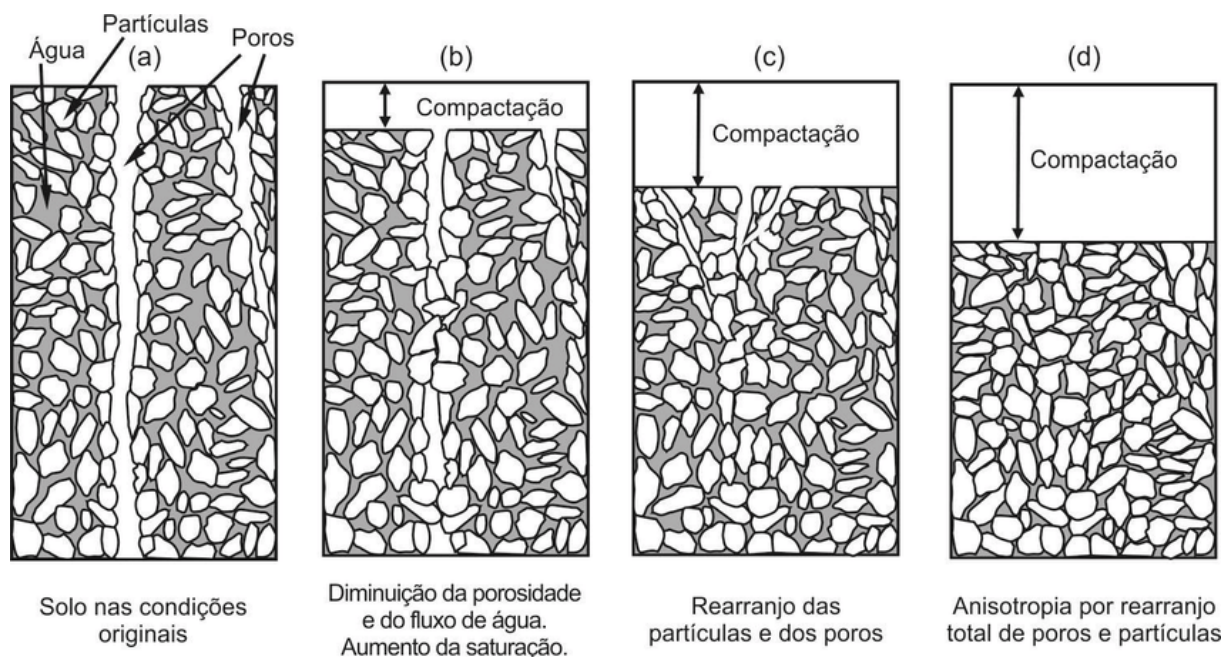


Figura 3 – Distribuição de umidade para diferentes compactações do solo.

Fonte: MOLINA, 2017.

2.2 Estado da arte e medição de umidade em meio poroso

Para a determinação da umidade em meios porosos, pesquisadores têm estudado profundamente as diversas técnicas existentes, que podem ser divididas em técnicas clássicas e modernas (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

As técnicas de medição de umidade clássicas incluem as medições termogravimétricas e pelo uso de carboneto de cálcio. Já as técnicas modernas utilizam tensiômetros, sensores resistivos, sensores de infravermelho, reflectometria no domínio do tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*), reflectometria no domínio da frequência (FDR – *Frequency Domain Reflectometry*) técnicas capacitivas, sensores por fluxo de calor, sistemas micromecânico-eletrônicos e técnicas ópticas. O princípio das técnicas mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho serão discutidas a seguir. Outras técnicas (dispersão de nêutrons, atenuação gama, radar por penetração no solo (GPR), sistemas microeletromecânicos (MEMS), resistividade, dissipação térmica e fluxo de calor, tensiômetro, ópticos e microondas) estão disponíveis no Apêndice A.

2.3 Métodos clássicos de medição de umidade

Os métodos clássicos de medição de umidade envolvem técnicas para remover a água da amostra de interesse por meio da evaporação. O método gravimétrico é considerado o método padrão, ou método padrão de estufa, e consiste em secar a amostra a 105 °C em uma estufa por 24 horas (RÊGO SEGUNDO, 2014). A diferença entre a massa da amostra úmida e seca define a massa de água presente no meio poroso. Define-se a umidade com base em peso seco como a proporção da massa da água retirada e a massa seca da amostra :

$$u_p = \frac{m_{H_2O}}{m_s} , \quad (1)$$

em que u_p é a umidade em peso (kg.kg^{-1}); m_{H_2O} é a massa da água (kg); e m_s é a massa do minério seco (kg).

O produto da umidade em peso e a massa específica aparente do meio poroso, por definição, é a umidade em volume, ou a razão volumétrica de água, expressa em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$.

O método gravimétrico fornece resultados precisos independentemente da salinidade ou do tipo do meio poroso. Porém, o método é considerado destrutivo, já que as amostras após serem secas repetidamente em estufa, têm suas estruturas perturbadas (F.S. ZAZUETA, 1994). Outra desvantagem do método é o tempo para ser executado e a quantidade de equipamentos necessários, como balança e estufa controlada.

É importante ressaltar que alguns materiais, como a argila, conseguem reter uma boa quantidade de umidade em sua estrutura, mesmo a 105 °C. Por outro lado, alguns materiais orgânicos apresentam perda de peso a 105 °C não devido à perda de umidade, mas sim, devido à oxidação que ocorre a essa temperatura. Sugere-se a utilização de várias amostras para diminuir os erros que acontecem devido a esses fenômenos (HILLEL, 1982).

Outra técnica clássica utiliza carboneto de cálcio para determinar a umidade de meios porosos, de modo rápido e com aplicações tanto em laboratório quanto em campo. Essa técnica utiliza a pressão de gás que aparece após a reação química entre o carboneto de cálcio e a umidade presente na amostra a ser testada. O gás acetileno, que é gerado após a reação, é confinado e a pressão que ele gera é medida em uma estufa vedada. Por meio de um medidor de pressão, a umidade aparente é estimada, com base em uma calibração desenvolvida com

amostras com umidade conhecidas, medidas por meio do método gravimétrico (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

Alguns tipos de solo plásticos, como a argila, em que sua estrutura se encontra muito condensada, este método não é eficiente, visto que o reagente não entra em contato com grande parte da umidade. Para este método, 20 g de amostra do material poroso ou solo requer, aproximadamente, 22 g de reagente, além do equipamento e pessoas preparadas para realizar o experimento (ASTM D 4944, 2008), o que o torna um método mais caro e complexo de ser executado.

2.4 Métodos modernos de medição de umidade

Os métodos modernos de medição de umidade em meios porosos englobam diferentes técnicas que utilizam propriedades elétricas do material, como constante dielétrica, capacitância, impedância e resistividade. Também são empregadas técnicas utilizando infravermelho, radioatividade, características ópticas entre outras. Essas técnicas podem ser empregadas tanto em laboratório quanto em campo, e apresentam diversas vantagens e desvantagens que serão discutidas a seguir. A medição da umidade por meio da medida de capacitância é o tema foco deste trabalho e será discutida com mais detalhes.

2.5 Dielétrico

A constante dielétrica dos materiais é uma importante propriedade utilizada para se determinar a umidade, devido à grande diferença entre a constante dielétrica relativa, que é adimensional, de materiais secos (varia de 2 a 5 para solos, por exemplo) e da água pura (em torno de 80 a 81 a 20 °C), quando medidas utilizando um sinal de frequência de até 1 GHz (RÊGO SEGUNDO, 2014). As técnicas de reflectometria no domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry* - TDR), técnicas capacitivas, a reflectometria no domínio da frequência (*Frequency Reflectometry Domain* - FDR) e a reflectometria no domínio da amplitude (*Amplitude Reflectometry Domain* - ADR) utilizam essa propriedade como fundamento para o processo de medição.

2.5.1 Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

O método TDR, que se tornou bastante utilizado para a medição de umidade em materiais porosos (D.A. ROBINSON, C.S. CAMPBELL, J.W. HOPMANS, B.K. HORNBUCKLE; JONES, 2008), determina a permissividade dielétrica do meio, ϵ_a medindo-se o tempo de atraso entre pulsos de ondas eletromagnéticas incidentes e refletidas que se propagam em uma sonda condutora, contendo hastes paralelas, normalmente de aço inox (RÊGO SEGUNDO, 2014; SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). A constante dielétrica aparente é calculada de acordo com as Equações 2 e 3 (G.C. TOPP, J.L. DAVIS, 1980):

$$\epsilon_a = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2, \quad (2)$$

$$\theta = 4,3 \cdot 10^{-6}(\epsilon_a)^2 - 5,5 \cdot 10^{-4}(\epsilon_a) + 2,92 \cdot 10^{-2}(\epsilon_a) - 5,3 \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

em que c é a velocidade da luz ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$); t é o tempo transiente que um pulso eletromagnético leva para percorrer a distância de uma linha de transmissão (s); L é o tamanho da sonda (m); e θ é a umidade volumétrica do material poroso.

A sonda guia é instalada no material a uma profundidade máxima entre 0,3 e 0,6 m, e normalmente possui duas ou mais hastes de aço inoxidável. O resultado do método TDR é muito preciso, fornece o resultado rapidamente (em torno de 28 s), possui alta repetibilidade e não depende da textura do material, da temperatura ou da composição mineral, além de poder ser automatizado (NOBORIO, 2001). O método pode ser executado utilizando até 1 GHz de frequência.

A grande desvantagem do método está no alto custo inicial para aquisição do equipamento (K. GIESE, 1975). Outra desvantagem é que pode ocorrer perda na reflexão das ondas quando em meio altamente salino. O método também pode ser aplicado para medir a condutividade elétrica do material, por meio da relação entre o coeficiente de reflexão do sinal TDR e a condutividade elétrica (MANTENUTO et al., 2014).

A relação da umidade volumétrica com a constante dielétrica em solos foi estudada entre as frequências de 1 MHz e 1 GHz, e o efeito da densidade aparente, da temperatura e da umidade

nesta relação foram bem definidos (G.C. TOPP, J.L. DAVIS, 1980). A pesquisa mostra que a parte real da constante dielétrica complexa, ϵ' , é independente da frequência e muito sensível à umidade do solo. A Equação 4 expressa matematicamente a constante dielétrica complexa:

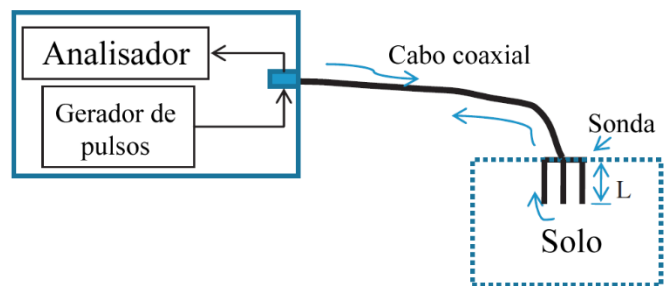
$$\epsilon_r = \epsilon' + j \left(\epsilon'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right), \quad (4)$$

em que ϵ_r é a constante dielétrica complexa relativa; ϵ' é a parte real da constante dielétrica complexa; ϵ'' é a parte imaginária da constante dielétrica; σ_{dc} é a condutividade correspondente à frequência nula (μS); ω é a frequência angular (rad.s^{-1}); ϵ_0 é a permissividade no vácuo ($8,854\text{pF/m}$).

Para frequências entre 1 MHz e 1 GHz, é demonstrado que a constante dielétrica aparente $\epsilon_a \approx \epsilon'$, em que ϵ_a varia de acordo com a umidade volumétrica θ do meio, para todos os diferentes tipos de amostras utilizados na pesquisa e que a temperatura apresenta influência desprezível (G.C. TOPP, J.L. DAVIS, 1980). Uma comparação entre os métodos TDR e capacitivo mostra que o método capacitivo apresenta resultados tão bons quanto o TDR para a constante dielétrica em solos com baixa salinidade (até 3 dS.m^{-1}), porém com menor custo (RÊGO SEGUNDO, 2014). A Figura 4 mostra um sensor comercial do tipo TDR.



(a)



(b)

Figura 4 – Exemplo de TDR comercializado pela Enviromonitors (a) e esquemático de um TDR.

Fonte: “TDR100 SOIL MOISTURE METER”, 2018 e LEKSHMI *et al* 2014 (b).

2.5.2 Reflectometria no domínio da amplitude (ADR) ou sensor de impedância

O método por ADR utiliza o princípio em que quando uma onda eletromagnética percorre uma linha de transmissão, e esse meio de propagação muda de impedância, por exemplo uma sonda imersa no solo em que o meio se altera entre o material condutor da sonda e o próprio solo, parte da energia transmitida é refletida de volta ao emissor. A onda de tensão estacionária observada através da interação entre onda transmitida e refletida ao longo da linha de transmissão altera a amplitude da tensão. A diferença da amplitude é relacionada à impedância do sonda no solo, e a umidade pode ser, então, estimada (RÊGO SEGUNDO, 2014).

A onda eletromagnética normalmente é gerada com frequência de 100 MHz, por um gerador de sinais, ou oscilador (G.J. GASKIN, 1996; V.A. RINALDI, 1999; SUSHAL EKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). Assim como no TDR, o efeito da condutividade do solo pode ser minimizado aumentando-se a frequência do sinal emitido.

Como principais vantagens, o método possui baixa incerteza de medição, quando calibrado para o solo de interesse, mesmo em solos com alta salinidade, e é relativamente barato, porém os espaços vazios no solo afetam a medição, bem como a calibração faz-se necessária. Esta linha de pesquisa ainda é uma área a ser explorada. A Figura 5 mostra um esquemático do sensor de impedância.

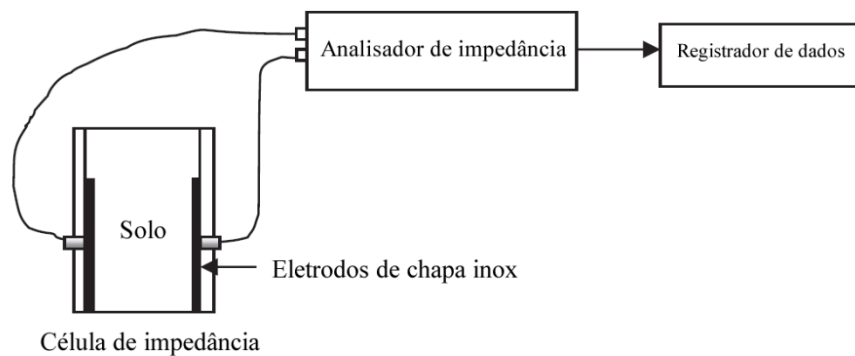


Figura 5 – Sensor de impedância.

Fonte: LEKSHMI *et al* 2014.

2.5.3 Método capacitivo e reflectometria no domínio da frequência (FDR)

O método capacitivo é o método de interesse e será aprofundado ao decorrer deste trabalho. Neste método utiliza-se como fundamento estimar a umidade correlacionando-a com a constante dielétrica do meio poroso sob teste, por meio da medição da capacitância.

A capacitância pode ser medida com base no tempo de carga e descarga do capacitor, que varia de acordo com a permissividade ou constante dielétrica do meio (J.R. WHALLEY, T.J. DEAN, 1992; M. ROBINSON, 1993; C. GARDNER, T. DEAN, 1997; J. MINET, S. LAMBOT, G. DELAIDE, J.A. HUISMAN, H.A. VEREECKEN; VANCLOOSTER, 2010).

O capacitor normalmente consiste em um par de eletrodos inoxidáveis, podendo também ser encontrado em formato de anel ou como um arranjo de diversos pequenos capacitores. Já o método FDR utiliza ondas de rádio frequência (10 MHz a 150 MHz) para medir a capacitância do meio. O meio, que pode ser o solo ou, especificamente para este trabalho, o minério de ferro, atua como o dielétrico dos eletrodos inseridos. O método coleta diferentes valores da constante dielétrica para diferentes frequências, através de uma varredura automatizada. Ambas as técnicas dependem das propriedades do material sob teste, e frequentemente necessitam de calibração, já que para frequências menores que 100 MHz a permissividade dos minerais presentes no meio poroso podem ser alteradas, fazendo com que as medições sejam mais afetadas pela temperatura, massa específica e salinidade (MUÑOZ-CARPENA, 2009; RÊGO SEGUNDO, 2014).

O custo inicial para o método capacitivo é menor que o do método TDR. Pesquisas voltadas para este tema (M.S. SEYFRIED, L.E. GRANT, E. DU, 2005) mostram que a constante dielétrica tem a sua parte complexa muito mais dependente da temperatura do que a parte real, o que afeta a estimativa da umidade do solo. A grande vantagem da varredura em frequência é que aumenta muito a precisão das medições e, então, da estimativa da umidade presente. O método FDR oferece maior acurácia para a medição da umidade do que o método TDR, porém a repetibilidade do método TDR mostra-se superior ao método capacitivo para solos com umidade volumétrica menor do que 5% (B.H. RAO, 2011), além do método FDR apresentar limitações e resultados imprecisos para meios porosos com muito espaço vazio ou ar. A Figura 6 mostra um esquemático de um sensor capacitivo e FDR.

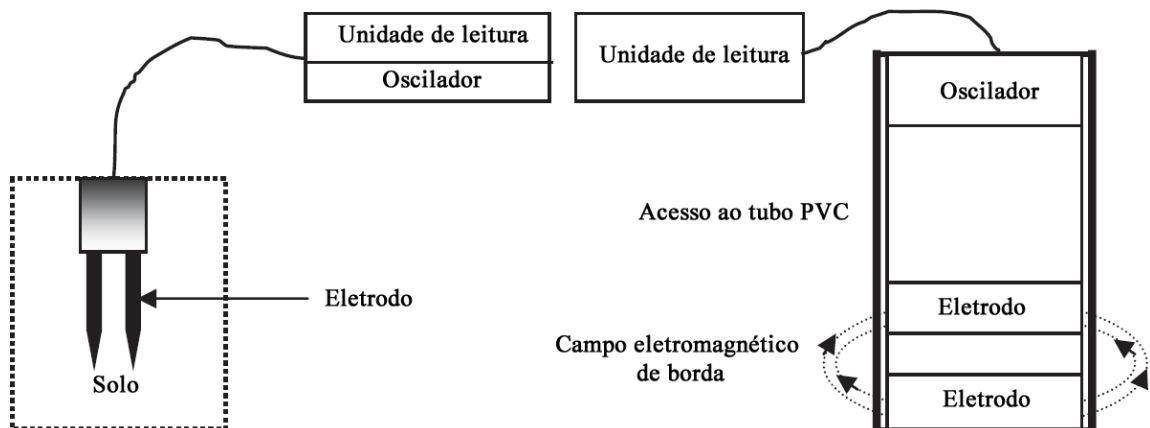


Figura 6 – (a) Sensor capacitivo e (b) FDR.

Fonte: LEKSHMI *et al* 2014.

3 MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE MEIOS POROSOS

A impedância é uma propriedade comumente utilizada para caracterizar alguns componentes eletrônicos, substâncias, fluidos, e diferentes tipos de matéria. Neste capítulo será apresentado um estudo aprofundado sobre o tema, bem como será apresentado e discutido o método escolhido para a medição automatizada deste trabalho: a ponte autobalanceada.

3.1 Propriedades Elétricas do Meio Poroso

O que torna a impedância de um material uma característica importante para a medição de umidade, é a grande diferença entre a constante dielétrica da água em relação à outras substâncias presentes na natureza. A Tabela 1 mostra a permissividade elétrica de alguns materiais encontrados na natureza, onde é possível verificar a grande diferença do valor da água (80 a 20 °C) em relação as outras substâncias.

Tabela 1 – Permissividade elétrica relativa de alguns materiais da natureza

Material	Permissividade elétrica relativa
Ar	1,0
Água (0, 20, 100, 200°C)	88,0; 80,1; 55,3; 34,5
Gelo (-3°C)	3,0
Basalto	12,0
Granito	7,0 a 9,0
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

Fonte: SILVA, 2005; RÊGO SEGUNDO, 2014.

3.2 Impedância e Permissividade Complexa

A impedância, que descreve a relação entre tensão e corrente na eletrodinâmica, tem seu comportamento verificado em regime transiente, quando em corrente contínua e em regime permanente, quando em corrente alternada, ou em sinais de frequência, foco deste trabalho. As Equações 5, 6 e 7 descrevem a tensão e corrente ao longo do tempo:

$$v(t) = V \cos(\omega t + \theta_v), \quad (5)$$

$$i(t) = I \cos(\omega t + \theta_i), \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (7)$$

em que f é a frequência do sinal (Hz); V é a tensão de pico (V); I é a corrente elétrica (A); e θ_v e θ_i são as fases iniciais (rad).

A impedância \mathbf{Z} pode ser calculada pela lei de Ohm, utilizando a notação complexa, de acordo com as equações a seguir, considerando que as propriedades dos materiais e dos componentes eletrônicos são invariantes no tempo:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}, \quad (8)$$

$$\mathbf{V} = V e^{j\theta_v}, \quad (9)$$

$$\mathbf{I} = I e^{j\theta_i}, \quad (10)$$

$$j = \sqrt{-1}. \quad (11)$$

Logo, pode-se calcular o módulo \mathbf{Z} e a fase θ_z da impedância complexa de acordo com a Equação 12:

$$\mathbf{Z} = \frac{V}{I} e^{j(\theta_v - \theta_i)} = Z e^{j\theta_z}. \quad (12)$$

O conceito de impedância se difere de resistividade, devido a uma diferença de fase que ocorre entre a corrente e a tensão. O inverso da impedância é normalmente utilizado por conveniência para alguns cálculos, chamado de admitância, e representado por

$$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{V}} = \frac{1}{\mathbf{Z}} = Y e^{j\theta_y} = \frac{1}{Z} e^{-j\theta_z}. \quad (13)$$

A admitância pode ser entendida como uma medida da facilidade em que um fluxo de corrente flui por um material, por isso é o inverso da impedância, que representa a resistência desse fluxo, medida a uma frequência conhecida f .

Como a impedância e a admitância são números complexos, eles podem ser convertidos para coordenadas cartesianas, sendo definidos os conceitos de reatância X e resistência R , partes imaginária e real de \mathbf{Z} , respectivamente, bem como condutância G e susceptância B , partes reais e imaginárias da admitância \mathbf{Y} , respectivamente. A Figura 7 mostra a relação entre essas propriedades em um plano complexo.

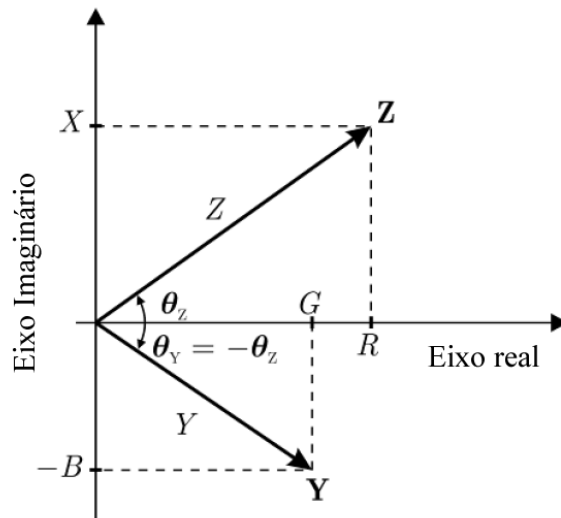


Figura 7 – Representação da impedância e admitância complexas, em coordenadas polares para definição da resistência, condutância, reatância e susceptância.

Fonte: SILVA, 2008.

Definem-se, então, as relações matemáticas, de acordo com a Figura 7:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (14)$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \quad (15)$$

$$\theta_z = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right), \quad (16)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{B}{G} \right). \quad (17)$$

As Equações 15-18 são utilizadas não só em eletrodinâmica, como também no estudo de propagação de ondas como acústica e elasticidade. Pelo plano complexo fica simples de entender que, para $\theta = 0$, a impedância contém apenas sua componente real, sendo, então, um elemento puramente resistivo. Um resistor é uma impedância com essa característica. Quando

$\theta = \pm 90^\circ$, ou seja, a impedância possui apenas sua componente imaginária, surge o conceito de capacitância e indutância.

Dado um elemento qualquer da natureza, ele é denominado capacitivo ou indutivo de acordo com o sinal da parte imaginária de sua impedância. Essa diferença de $\pm 90^\circ$, característica de materiais capacitivos ou indutivos, aparece na eletrodinâmica como diferença de fase entre tensão e corrente. Porém, um parâmetro muito utilizado para caracterizar os materiais da natureza, é a permissividade complexa relativa ϵ_r , um número adimensional, e relacionado com a permissividade complexa absoluta ϵ_a , medida em $F \cdot m^{-1}$, de acordo com a Equação 18:

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r, \quad (18)$$

em que ϵ_0 representa a permissividade do vácuo e vale $8,854 \text{ pF} \cdot m^{-1}$. A permissividade complexa relativa ainda pode ser expressa de acordo com a Equação 19:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' . \quad (19)$$

A parte real da permissividade complexa descreve como o material armazena um campo elétrico em forma de energia e a parte imaginária está relacionada às perdas de energia no material como, perda dielétrica, relaxação ou efeito ressonante e perdas por condutividades iônicas (SILVA, 2008; RÊGO SEGUNDO, 2014). Para se medir a impedância de materiais, utiliza-se uma sonda ou uma célula contendo duas placas de metal idênticas e paralelas entre si, como um grande capacitor. A relação entre as propriedades geométricas de célula com placas quadradas, k_g , define a admitância da mesma, e é dada pelas Equações 20 e 21:

$$\mathbf{Y} = j\omega k_g \epsilon_0 \epsilon, \quad (20)$$

$$k_g = \frac{l^2}{d} = \frac{A}{d}, \quad (21)$$

em que A é a área das placas com comprimento l (m^2); e d é a distância entre as placas (m);

Na Figura 8 exibe-se um circuito esquemático de uma célula de medição.

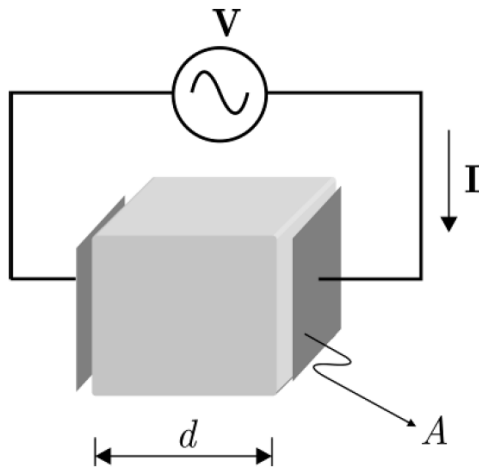


Figura 8 – Célula de medição.

Fonte: SILVA, 2008.

A célula é representada eletronicamente por uma capacitância C em paralelo com uma condutância G , de acordo com a Figura 9.

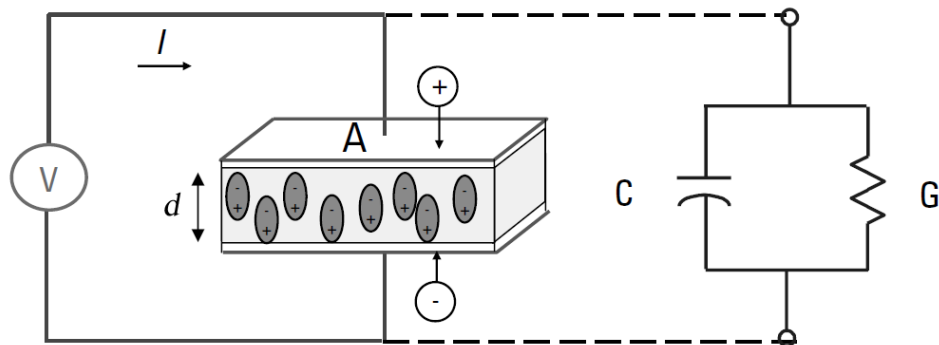


Figura 9 – Representação em circuito eletrônico da célula.

Fonte: AGILENT, 2005.

As equações 20 e 21 podem ser reescritas em função da capacitância C e explicitando k_g :

$$C = \epsilon_a \left(\frac{A}{d} \right), \quad (22)$$

Considerando um material entre as placas, por exemplo o minério de ferro para o caso deste trabalho, a capacitância é definida por:

$$C_{mat} = \varepsilon_0 \varepsilon'_{mat} \left(\frac{A}{d} \right). \quad (23)$$

A permissividade complexa ε depende das características do material dielétrico inserido entre as placas da célula, enquanto a admitância \mathbf{Y} e a impedância \mathbf{Z} dependem da geometria da célula, de acordo com o fator k_g . A capacitância da célula a vazio, apenas com ar entre as placas, pode ser facilmente calculada pela expressão $C_0 = k_g \varepsilon_0$. Vale lembrar que na Equação 20, pode-se representá-la no domínio da frequência fazendo-se $s = j\omega$. Essa transformação será utilizada neste trabalho para análise da resposta dos modelos no domínio da frequência. Sendo assim, pode-se construir uma tabela com as transformadas importantes entre a permissividade, impedância e admitância:

Tabela 2 – Relação entre impedância, admitância e permissividade considerando a capacitância à vazio de uma célula de medição no domínio da frequência

	\mathbf{Z}	\mathbf{Y}	ε
$\mathbf{Z} =$	-	\mathbf{Y}^{-1}	$(sC_0)^{-1} \varepsilon^{-1}$
$\mathbf{Y} =$	\mathbf{Z}^{-1}	-	$(sC_0) \varepsilon$
$\varepsilon =$	$(sC_0)^{-1} \mathbf{Z}^{-1}$	$(sC_0)^{-1} \mathbf{Y}$	-

Fonte: adaptado de SILVA, 2008.

3.3 Comportamento do Dielétrico

A permissividade dos materiais varia de acordo com a polarização do dielétrico. Essa polarização pode acontecer de diferentes formas. As cargas presentes no dielétrico podem se arranjar em diferentes formatos quando aplicado um campo elétrico. Para compensar o campo elétrico, as cargas se tornam polarizadas, de forma que as cargas negativas do dielétrico

apontem para o polo positivo do campo elétrico, assim como as cargas negativas apontem para o polo positivo do campo.

Os diferentes mecanismos que fazem com que as cargas do dielétrico se reorganizem na presença de um campo elétrico foram estudados microscopicamente e foram divididos em orientação do dipolo, corrente iônica, atômica e eletrônica. Os diferentes comportamentos do dielétrico ocorrem para diferentes frequências do campo elétrico aplicado.

A corrente iônica e a orientação dipolar são observadas fortemente para baixas frequências, em torno de 1 kHz e 10 GHz e praticamente não ocorrem para frequências maiores (AGILENT, 2005). Por exemplo as moléculas de água, por serem formadas por um dipolo permanente, fazem parte desse mecanismo, e se reorientam de acordo com o campo elétrico. Esse é o princípio básico do forno de micro-ondas, que ao ser aplicado um campo elétrico com uma frequência fixa, faz com que as moléculas de água girem com essa mesma frequência, e aqueçam assim os alimentos, o que mostra também que esses movimentos geram perdas, nesse caso em forma de calor. A Figura 10 mostra a molécula polar da água e um exemplo de uma molécula apolar, do trifluoreno de boro, que não se orienta ao campo elétrico.



Figura 10 – Molécula polar de água H_2O e molécula apolar de trifluoreno de boro BF_3 .

Fonte: GENTILINI, 2012.

Um campo elétrico aplicado às moléculas polares cria um torque T nessas moléculas e fazem com que o dipolo rotacione, reorientando essas moléculas. Se a direção do campo se altera, o torque também se altera e as moléculas tendem a se reorientar novamente. A Figura 11 mostra o torque que aparece em um dipolo molecular, rotacionando a molécula. A fricção que acompanha a reorientação das moléculas contribui para as perdas dielétricas relacionadas com ϵ'' .

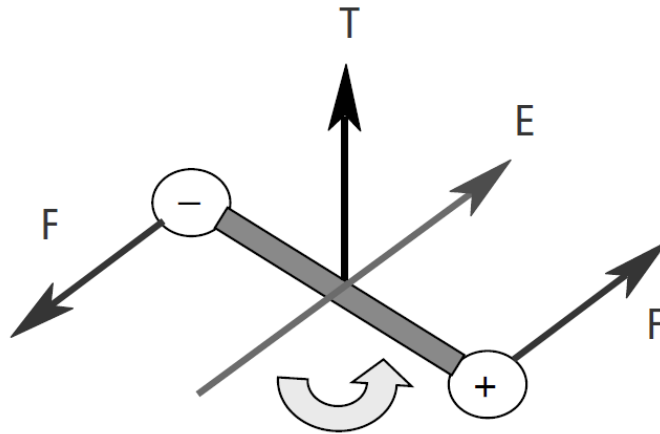


Figura 11 – Torque resultante devido a presença de um campo elétrico que rotaciona uma molécula polar.

Fonte: AGILENT, 2005.

O comportamento atômico e eletrônico do dielétrico tem uma influência relativamente fraca e normalmente constantes para baixas frequências para ϵ' , porém, influenciam fortemente para altas frequências. As frequências para o campo elétrico aplicado em que o comportamento do dielétrico se alteram em relação a ϵ' são chamadas de frequências de corte, e variam de acordo com o material do dielétrico. A magnitude também é função do material do dielétrico.

Como a água tem um comportamento dipolar muito distinto para baixas frequências em comparação com altas frequências, torna essa uma característica fundamental para medir a umidade em materiais. Na Figura 12 mostram-se os diferentes comportamentos do dielétrico para diferentes frequências aplicadas de um campo elétrico. Pode-se verificar as diferentes magnitudes para ϵ' para diferentes frequências. Para o fator de perda ϵ'' , são observados picos que correspondem às frequências de corte.

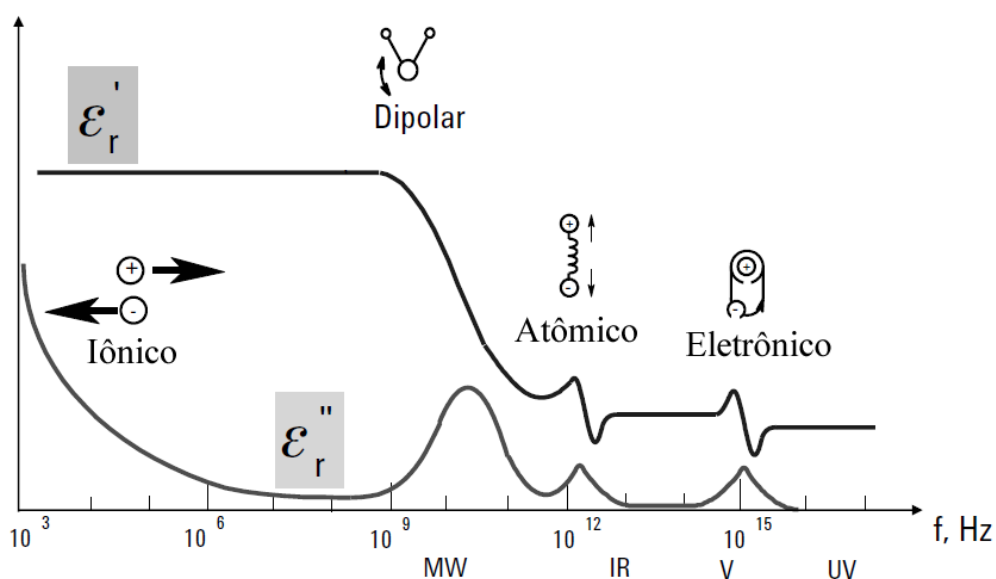


Figura 12 – Comportamento do dielétrico para diferentes frequências.

Fonte: AGILENT, 2005.

Já para o comportamento atômico, esse pode ser considerado um sistema oscilatório com amortecimento, similar a um sistema massa-mola (como mostra na Figura 12). A amplitude de oscilação será maior na frequência de ressonância com o campo elétrico. Já o comportamento eletrônico, ocorre em átomos neutros e, neste caso, é observado um grande desvio dos elétrons em relação ao núcleo, quando o átomo está em ressonância com a frequência do campo elétrico aplicado (vide Figura 12). Esses dois comportamentos são observados apenas em altas ou altíssimas frequências e seus comportamentos influenciam pouco ϵ' e tem mais influência nas perdas, ou seja, ϵ'' .

As frequências de ressonância são identificadas pelos picos de ϵ'' , e a contribuição desses efeitos é nula quando a frequência do campo elétrico é maior do que frequências de ressonância. Um fator importante no comportamento do dielétrico é o tempo de relaxamento das moléculas, que é a medida de como o dipolo pode se mover em cada tipo de material, ou seja, é o tempo em que a molécula leva para se orientar na presença de um campo elétrico. Essa medida varia de acordo com o material devido à liberdade de movimento das moléculas. Por exemplo em líquidos e sólidos, as moléculas estão mais condensadas, e os seus movimentos geram muita fricção além de serem difíceis e lentos, logo o tempo de relaxamento é maior. Quando o campo elétrico é desligado, o movimento contrário naturalmente é observado, porém, aleatoriamente,

já que não existe a presença do campo elétrico. O mesmo tempo de relaxamento é observado. O tempo de relaxamento é inversamente proporcional à frequência de relaxamento, e é dado pela Equação 24:

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c}, \quad (24)$$

em que τ é o tempo de relaxamento (s); f_c é a frequência de corte ou de relaxamento (Hz).

Para frequências do campo elétrico menores que a de relaxamento, o dipolo é capaz de acompanhar o campo e se reorientar. Como nesse caso a reorientação é completa, a perda ϵ'' é diretamente proporcional à frequência. A diferença de fase entre o campo elétrico e a orientação do dipolo começa a aumentar à medida que a frequência do campo aumenta, logo as perdas ϵ'' também aumentam, porém, o armazenamento ϵ' diminui. Para frequências do campo elétrico acima da frequência de relaxamento, ambos ϵ'' e ϵ' desaparecem, pois as moléculas não conseguem mais acompanhar o campo, ou seja, o dipolo não se reorienta mais. Materiais que apresentam o tempo de relaxamento constante, como a água, podem ser modelados pela equação de Debye, mostrada no domínio da frequência de acordo com a Equação 25 (AGILENT, 2005; SILVA, 2008).

$$\epsilon(s) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + s\tau}, \quad (25)$$

em que, quando $\omega=0$, $\epsilon(0) = \epsilon_s$ e ainda quando $\omega \rightarrow \infty$, $\epsilon(\infty) = \epsilon_\infty$. A Figura 13 mostra a resposta em frequência da permissividade para a água, a 30 °C de acordo com a equação de Debye. Como citado anteriormente é notável que ϵ' é constante para frequências acima e abaixo da frequência de relaxamento, nesse caso em torno de 22 GHz. Percebe-se ainda um pico em ϵ'' , que corresponde à frequência de relaxamento, ou frequência de corte.

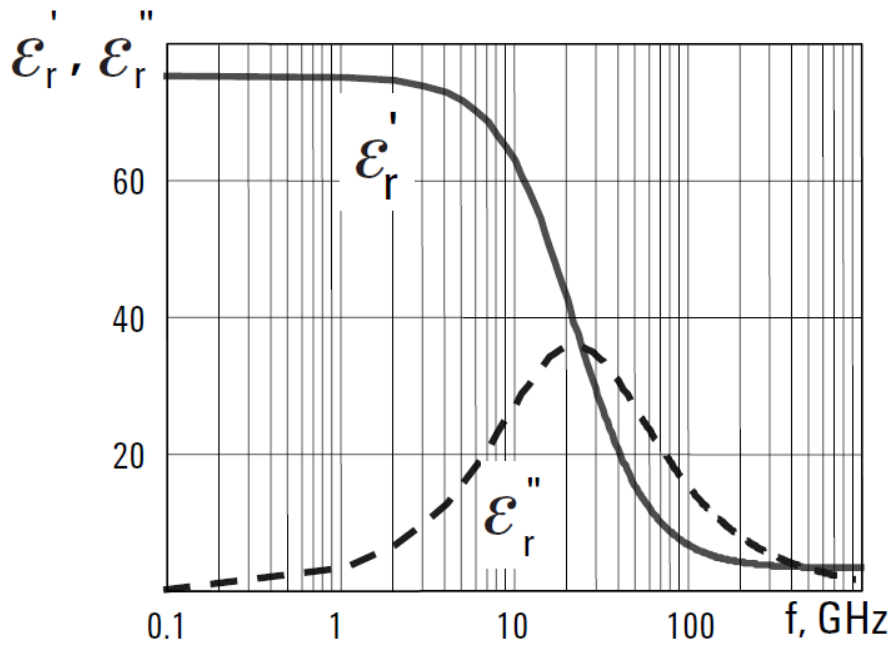


Figura 13 – Permissividade da água a 30 °C no domínio da frequência.

Fonte: AGILENT, 2005.

Para a curva da Figura 13 foram utilizados $\epsilon_{\infty} = 4,9$ (constante dielétrica para uma frequência altíssima, considerada infinita), $\epsilon_s = 76,47$ (constante dielétrica estática, para frequência nula) e o tempo de relaxamento $t = 7,2$ ps. Para baixas frequências, pode-se expressar a equação de Debye como um circuito equivalente com um capacitor e um resistor em paralelo, cuja a admitância pode ser calculada pela Equação 26, no domínio da frequência (SILVA, 2008; RÊGO SEGUNDO, 2014):

$$\mathbf{Y} = k_g(\sigma + s\epsilon_0\epsilon), \quad (26)$$

em que σ é a condutividade do meio ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); k_g é a constante geométrica; e $s = j\omega$.

A Equação 26 pode ser separada em:

$$\mathbf{Y} = G + sC \quad (27)$$

em que \mathbf{Y} é a admitância complexa (S); G é a condutância, que assume o valor $k_g\sigma$ (S); e C é a capacitância, que assume o valor $k_g\varepsilon_0\varepsilon$ (F).

3.4 Técnicas de medição de impedância e a ponte autobalanceada

Como citado anteriormente, a impedância é uma medida complexa. Para quantificá-la, é necessário medir sua magnitude e sua fase, ou seja, sua parte real e imaginária. Na eletrodinâmica, medir a impedância complexa significa medir tensão e corrente. Em geral, aplica-se um estímulo à um eletrodo conhecido, e mede-se a resposta, em tensão e/ou corrente. Existem diferentes métodos (MACDONALD, 1987) para se medir a impedância por meio da utilização de circuitos analógicos e digitais (KAATZE; FELDMAN, 2006) e com auxílio de microprocessadores. Para altas frequências, medir tensão e corrente torna-se difícil, e para este caso, são aplicadas técnicas complexas como de transmissão e reflexão de ondas (AGILENT, 2005), que exigem um complexo processamento para geração e processamento dos sinais. Já para baixas frequências (até alguns MHz), pode-se determinar a impedância com a utilização de circuitos ressonantes ou pontes.

3.4.1 Circuitos para medição em baixa frequência

O método mais simples de medir uma impedância é através da aplicação de um sinal senoidal de tensão conhecido nos terminais da impedância de interesse, e medir sua magnitude e a fase da corrente, ou vice-versa. O ângulo da fase é medido pela diferença de fase entre tensão e corrente. A Figura 14 mostra o circuito básico utilizado para este método, sendo \mathbf{Z}_x a impedância de interesse, \mathbf{V} a tensão senoidal conhecida de entrada, \mathbf{I} a corrente, R a resistência de valor conhecido e menor que o módulo da impedância (Z_x) e \mathbf{V}_1 e \mathbf{V}_2 as tensões medidas. O circuito (a) mostra o princípio básico da aplicação do circuito, já o circuito (b) apresenta a aplicação prática do método, em que são feitas duas medidas de tensão (SILVA, 2008).

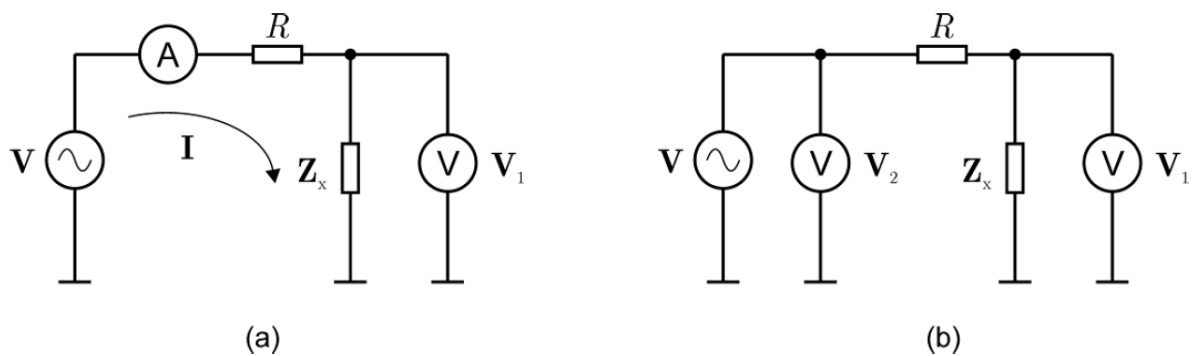


Figura 14 – Método com circuito simples de medição de impedância. (a) Princípio básico e (b) circuito prático mais utilizado. Fonte: SILVA, 2008.

A Equação 28 descreve matematicamente o circuito da Figura 26 (b):

$$Z_x = \left(\frac{V_1}{V_2 - V_1} \right) R. \quad (28)$$

Este método possui a desvantagem de apresentar baixa precisão na medida da impedância de interesse. Além do circuito simples, um outro método muito utilizado é utilizando os circuitos em pontes. Eles são aplicados em equipamentos padrões e de baixo custo em laboratórios para se medir impedâncias utilizando até 300 MHz. A resposta, além de rápida, tem alta precisão. A ponte de Wheatstone é mostrada na Figura 15 e tem seu princípio baseado em que qualquer desequilíbrio entre as 4 impedâncias gera uma tensão V_d diferente de zero, de acordo com a Equação 29 (SILVA, 2008).

$$\frac{Z_x}{Z_2} = \frac{Z_1}{Z_3}. \quad (29)$$

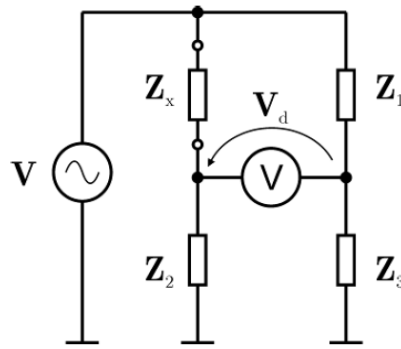


Figura 15 – Circuito em ponte para medição da impedância.

Fonte: SILVA, 2008.

Conhecendo os valores de Z_1 , Z_2 e Z_3 , e alterando-se por exemplo Z_3 , até que o equilíbrio seja alcançado ($V_d = 0$), calcula-se o valor da impedância de interesse Z_x . Como é sabido, a impedância é um número complexo composta por magnitude e fase, logo pode-se calcular cada termo separadamente: o módulo é calculado de acordo com a Equação 30 o ângulo é de acordo com a Equação 31:

$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_3} Z_2, \quad (30)$$

$$\theta_x = \theta_1 - \theta_3 + \theta_2. \quad (31)$$

Porém atingir o equilíbrio ($V_d = 0$) não é simples. Logo, pode-se utilizar a ponte não balanceada. Dessa forma é necessário medir a tensão V_d e a impedância de interesse Z_x pode ser calculada de acordo com a equação genérica da ponte de Wheatstone, como mostrado na Equação 32:

$$\frac{V_d}{V} = \frac{Z_2}{Z_x + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_1 + Z_3}. \quad (32)$$

Para a utilização da ponte, é necessário previamente saber se a impedância de interesse é capacitiva ou indutiva, para saber se existe avanço ou atraso de fase e poder calcular corretamente a parte imaginária. Além dos dois circuitos citados, um outro também utilizado para medir impedância, e que também exige que se saiba previamente se essa é capacitiva ou

indutiva, é o circuito ressonante, que utiliza o efeito de ressonância que acontece em circuitos com indutores e capacitores (circuitos LC ou RLC), de acordo com a Figura 16.

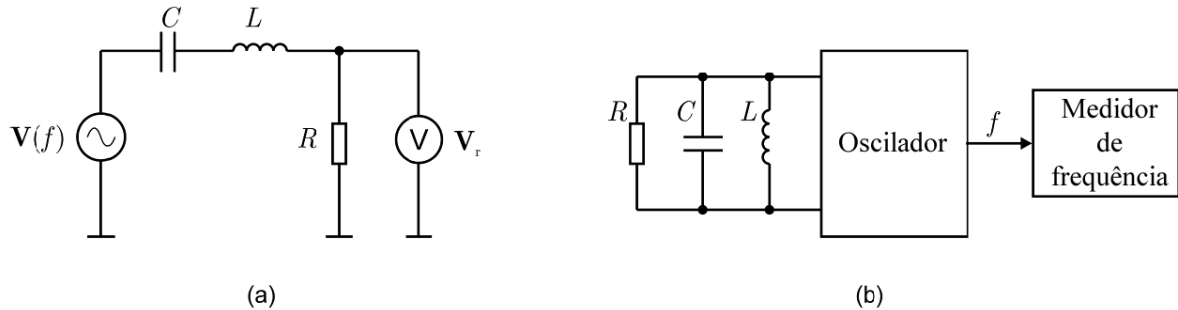


Figura 16 – Circuito RLC série (a) e RLC paralelo (b) para medição de impedância.

Fonte: SILVA, 2008.

A impedância de interesse é colocada em série com outra impedância conhecida. Neste caso, se Z_x é capacitiva, utiliza-se um indutor conhecido em série, ou se Z_x é indutiva, utiliza-se um capacitor conhecido em série. Por meio da Equação 33, calcula-se a impedância de interesse (sendo ela L ou C):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (33)$$

em que f_r é a frequência de ressonância.

A frequência de ressonância pode ser calculada de duas formas, como mostrado na Figura 16. Uma das formas é utilizando-se o circuito puramente reativo RLC , um sinal de tensão V_i é aplicado. Variando-se a sua frequência f , mede-se a tensão V_r . Quando a frequência de ressonância f_r é atingida, V_r terá o seu valor máximo e, então, a impedância de interesse é calculada de acordo com a Equação 33. Já utilizando-se o segundo circuito, Figura 16 (b), utiliza-se um circuito oscilador com a configuração RLC conhecida (apenas a impedância de interesse não é conhecida) e a frequência de saída do oscilador é medida. Na condição de ressonância, a parte imaginária do circuito é nula, ou seja, a impedância indutiva é igual à impedância capacitiva (em módulo), tornando o circuito puramente resistivo. Calcula-se, então, a parte resistiva da impedância de interesse (parte real) de acordo com a Equação 34:

$$R_x = \frac{V_r}{I_r}, \quad (34)$$

sendo V_r e I_r o módulo da tensão e da corrente medidas na condição de ressonância, respectivamente.

Os dois últimos métodos apresentados, circuito em ponte e circuito ressonante, apresentam boa precisão na medição da impedância de interesse, porém para se alcançar o equilíbrio, no caso da ponte, ou para encontrar a frequência de ressonância, como no último circuito discutido, torna-se uma tarefa complexa e a automatização do processo mais custosa. Uma desvantagem dos métodos apresentados anteriormente é que eles apresentam grande sensibilidade à capacitância de terra, que está presente nas sondas ou células de prova, devido ao aterramento dos cabos. De acordo com os estudos realizados para a medição de impedância por alguns autores citados neste trabalho, o método mais apropriado para a faixa de frequência de interesse é o chamado de ponte autobalanceada. É um circuito simples, preciso, com resposta rápida e imune à capacitância de terra (SILVA, 2008; RÊGO SEGUNDO et al., 2015), além de apresentar baixo custo.

4 CIRCUITO BASEADO EM PONTE AUTOBALANCEADA PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE

Para este circuito, um amplificador operacional (*ampop*) de transimpedância é utilizado para melhorar a medição da impedância de interesse, tendo alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Este circuito também é conhecido como conversor de corrente-tensão, amplificador de transimpedância ou ainda, circuito baseado em ponte autobalanceada.

Existe uma discussão sobre o nome do método ou circuito, se de fato utiliza uma ponte autobalanceada ou se não passa apenas de uma aplicação da lei de Ohm (CHAVANNE; BRUÈRE; FRANGI, 2017). Apesar de existir divergências entre a nomenclatura utilizada na literatura (utilizada em inglês as vezes *self-balance bridge*, as vezes *auto-balance bridge*), isso não altera a diferença existente entre a aplicação da lei de Ohm e utilização do comportamento dos circuitos em ponte, em que ocorre o equilíbrio entre as correntes envolvidas, para a medição de uma impedância desconhecida (RÊGO SEGUNDO et al., 2018). Para este trabalho, optou-se por utilizar o termo circuito baseado em ponte autobalanceada até o final.

A Figura 17 mostra o circuito com o princípio básico da ponte (a), bem como o circuito prático utilizado (b).

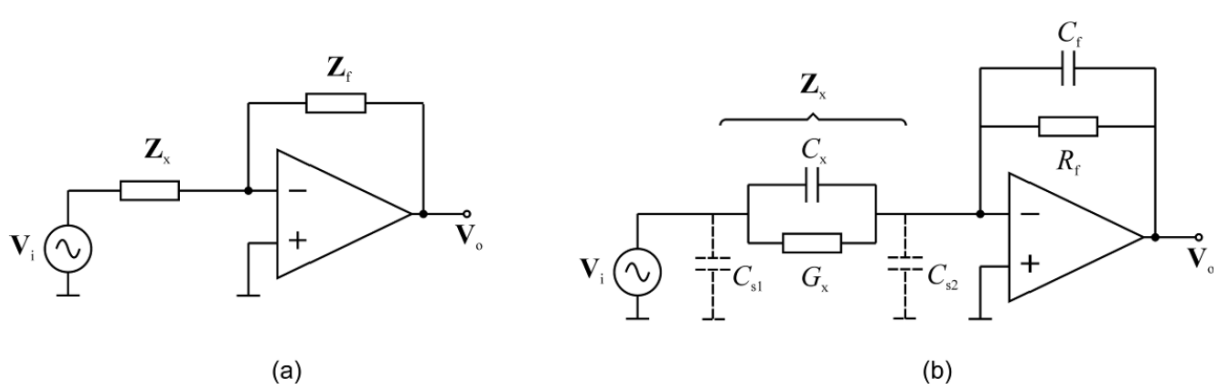


Figura 17 – (a) Ponte autobalanceda simples e (b) circuito prático utilizado.

Fonte: SILVA, 2008.

Na Figura 29, as variáveis apresentadas possuem os seguintes significados:

- Z_x : impedância de interesse (Ω);
- Z_f : impedância conhecida de realimentação (Ω);
- V_i : tensão de excitação ou de entrada conhecida (V);
- V_o : tensão de saída do amplificador operacional (V);
- C_x : parte capacitiva desconhecida da impedância (F);
- G_x : condutividade da parte resistiva da impedância desconhecida (μS);
- C_f : parte capacitiva da impedância conhecida (F);
- R_f : parte resistiva da impedância conhecida (Ω);
- C_{s1} e C_{s2} : capacitores de terra que não influenciam no circuito (F).

O amplificador operacional é configurado com o terra virtual (entrada positiva ou porta não inversora aterrada), em que a corrente de realimentação, que passa por Z_f , equilibra-se, com a corrente de entrada que passa por Z_x , de forma que o amplificador operacional seja forçado a aumentar a sua tensão de saída, para compensar o aumento de corrente em Z_f . Mede-se a tensão de saída V_o do amplificador operacional e, assumindo-se que o *ampop* é ideal, calcula-se a impedância de interesse Z_x de acordo com a Equação 35:

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_x} = -\frac{Y_x}{Y_f}. \quad (35)$$

Como mostrado na Figura 17 (b), as impedâncias Z_f e Z_x são formadas por um circuito RC paralelo e o ganho desse circuito no domínio da frequência (função de transferência do circuito) é calculado de acordo com a Equação 36:

$$F_T = \frac{V_0}{V_i} = -\left(\frac{G_x + sC_x}{G_f + sC_f}\right), \quad (36)$$

em que $s = j\omega$; $\omega = 2\pi f$ (rad.s⁻¹); f é a frequência de excitação de entrada (Hz); G_f é a condutância de R_f , ou $G_f = R_f^{-1}$ (μ S);

A função de transferência contém diversas informações importantes da resposta do sistema para diferentes sinais de excitação como degrau, rampa, impulso, etc. A resposta em frequência para o circuito foi gerada por Silva (2008), mantendo-se os valores da impedância de referência ($C_f = 10$ pF, $G_f = 10 \mu$ S (100 k Ω)) e variando a impedância de interesse Z_x (C_x e G_x), obtendo-se as curvas como mostrado na Figura 18.

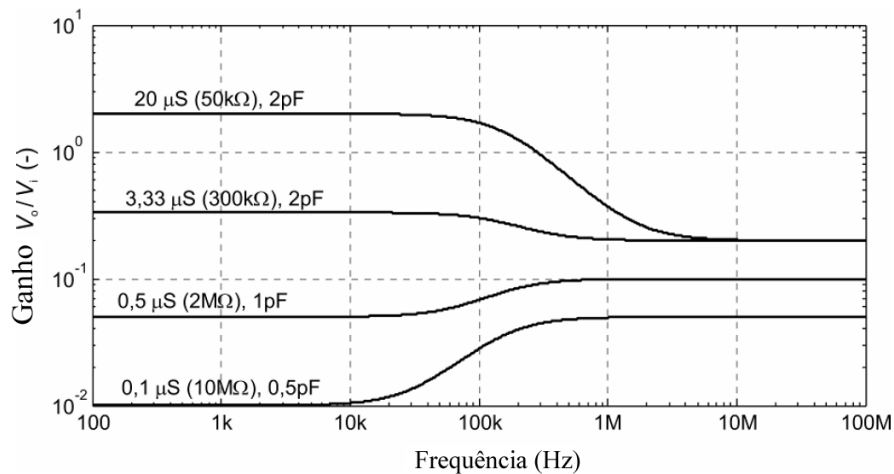


Figura 18 – Resposta em frequência do ganho da ponte autobalanceada.

Fonte: SILVA, 2008.

Como as tensões V_i e V_o são compostas por fase e magnitude, tem-se o ganho em módulo, de acordo com a Equação 37:

$$\left| \frac{V_i}{V_o} \right| = \left| \frac{Y_x}{Y_f} \right| = \sqrt{\frac{G_x^2 + (2\pi f)^2 C_x}{G_f^2 + (2\pi f)^2 C_f}} \quad (37)$$

Neste ponto apresenta-se um dos tópicos mais importantes e utilizados neste trabalho. O valor do módulo do ganho do circuito para uma determinada impedância desconhecida apresenta dois patamares bem definidos na resposta em frequência, um para frequências mais baixas e outro para frequências mais altas. Esses patamares assumem os seus valores conhecidos: $G_x G_f^{-1}$ e $C_x C_f^{-1}$ e são separados pelas frequências de corte. A Figura 19 mostra a resposta em frequência simplificada, onde é possível verificar os patamares bem definidos.

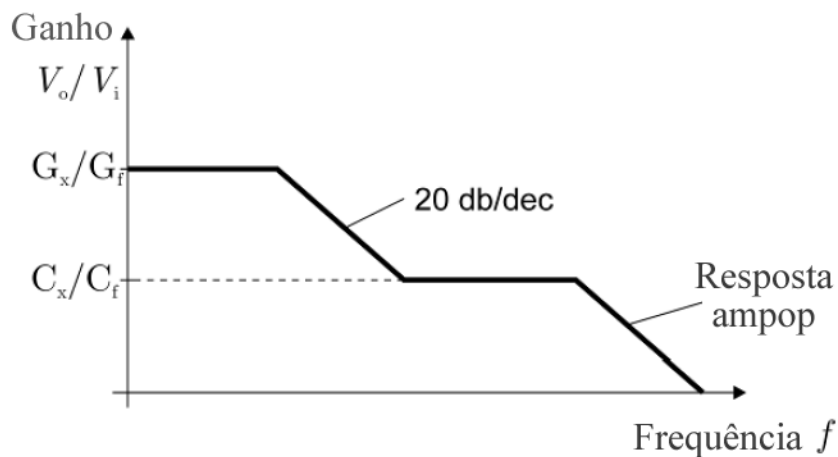


Figura 19 – Resposta em frequência simplificada do circuito.

Fonte: SILVA, 2008.

Dessa forma, deve-se definir duas frequências distintas, em que o ganho do circuito para essas frequências alcance os dois patamares distintos, possibilitando o cálculo da impedância de interesse, por meio do cálculo de G_x e C_x . A aplicação da ponte autobalanceada pode ser feita utilizando-se uma célula de prova, constituída por um grande capacitor, onde possa ser inserido entre os eletrodos diferentes substâncias para análise. A Figura 20 exemplifica bem este cenário.

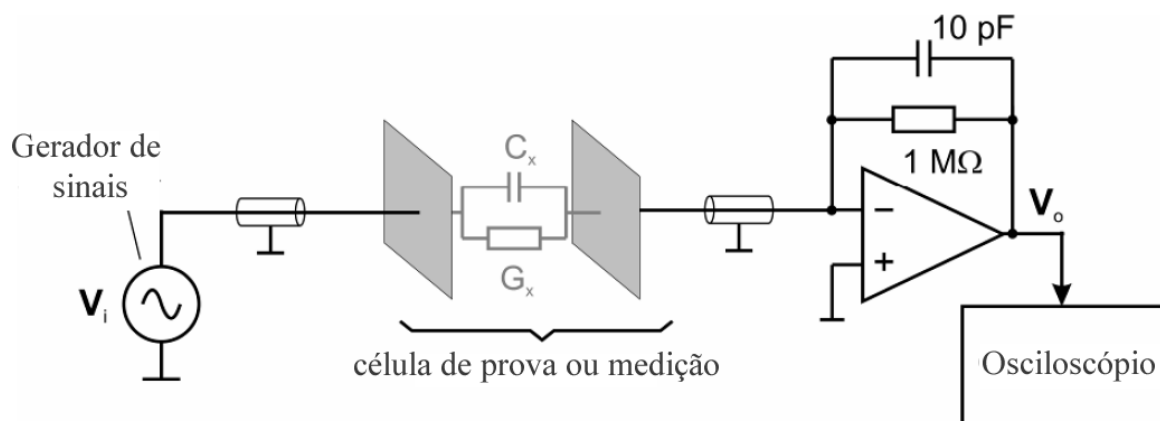


Figura 20 – Ponte autobalaneada com a célula de prova.

Fonte: SILVA, 2008.

Experimentos realizados por Silva (2008), mostram a resposta em frequência para diferentes substâncias inseridas como dielétricos na célula de prova. Os patamares observados foram claramente bem definidos, o que comprova, na prática, a teoria do circuito da ponte autobalaneada.

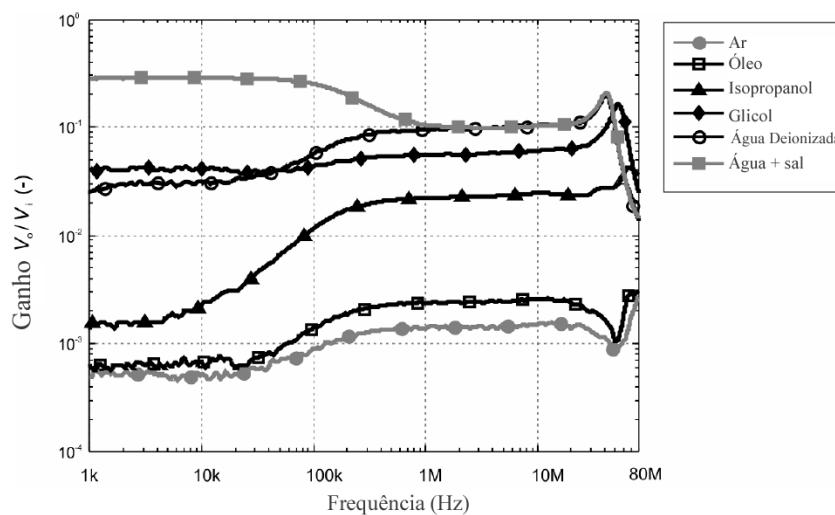


Figura 21 – Resposta em frequência para diferente substâncias.

Fonte: SILVA, 2008.

As substâncias e suas respectivas características utilizadas no experimento foram:

- Ar: $\epsilon = 1$, $\sigma = 0$. Óleo $\epsilon = 2$, $\sigma = 0$;

- Isopropanol $\varepsilon = 19$, $\sigma = 0,06 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;
- Glicol $\varepsilon = 37$, $\sigma = 3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;
- Água deionizada $\varepsilon = 79$, $\sigma = 2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;
- Água + sal $\varepsilon = 79$, $\sigma = 26 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Após o segundo patamar, alguns picos próximos a 60 MHz foram observados. Isso aconteceu devido à resposta em frequência do *ampop* utilizado no experimento (OPA656) apresentar um segundo polo em altas frequências, já que o amplificador operacional na prática tem sua largura de banda limitada, diferente de um *ampop* ideal (GAMIO J.C., YANG W.Q., 2001; SILVA, 2008).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Após o estudo dos métodos existentes para medição de umidade, iniciou-se a etapa de desenvolvimento dos experimentos, efetuados nos laboratórios da Escola de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto.

Com o objetivo de desenvolver um dispositivo capaz de medir a umidade em minério de ferro, o circuito baseado em ponte autobalanceado foi escolhida como método a ser utilizado neste trabalho.

Foram realizados 3 experimentos diferentes, sendo o primeiro utilizando uma metodologia diferente dos demais. O primeiro experimento utilizou apenas uma amostra de minério de ferro, completamente saturada em relação à umidade, e a secagem e o estudo da variação da constante dielétrica foram realizados utilizando uma estufa programada. Já o segundo e terceiro experimentos utilizaram amostras preparadas com diferentes umidades conhecidas. O terceiro experimento se diferenciou do segundo pois foi desenvolvido a fim de analisar a influência da compressão das amostras de minério no interior da célula de prova (densidade aparente das amostras), bem como a influência do teor de ferro e da granulometria no resultado de medição fornecido pelo sensor.

5.1 Desenvolvimento dos protótipos

Os protótipos foram desenvolvidos para realizar a função da célula de prova, mostrada na Figura 20.

Foram desenvolvidas 2 células diferentes, sendo a primeira uma célula menor para realização dos testes iniciais, com o objetivo de comprovar a eficiência do método. Já a segunda célula foi desenvolvida com dimensões maiores e foi projetada para ser adaptável a uma prensa mecânica, para tornar possível o estudo da influência da densidade aparente do minério durante os ensaios. Todos os procedimentos são descritos com mais detalhes neste capítulo.

As duas células foram desenvolvidas utilizando placas de acrílico cortadas a laser, e a montagem foi realizada utilizando clorofórmio para colá-las. As células possuem duas placas paralelas de metal galvanizado que atuam como um grande capacitor.

O desenho do primeiro protótipo é mostrado na Figura 22.

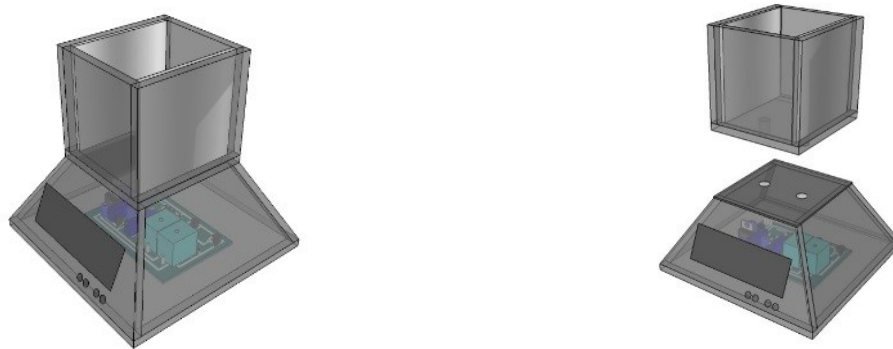


Figura 22 – Projeto do primeiro protótipo.

Para o primeiro protótipo foi construída apenas a célula de prova (elemento sensor superior). Já o segundo protótipo foi projetado para tornar possível a conexão de uma prensa mecânica à parte superior do sensor, bem como uma célula de carga na sua parte inferior, para medir a compressão realizada pela prensa. Outro fator que foi levado em consideração para o desenvolvimento do segundo protótipo, foi a dificuldade encontrada durante a montagem da parte inferior do sensor do primeiro protótipo, devido ao ângulo existente nas placas de acrílico, o que dificulta bastante a colagem das peças. Então, o segundo protótipo foi desenvolvido como

uma caixa, em que as placas estão dispostas sempre com 90° em relação às outras, a fim de facilitar a montagem. A Figura 23 mostra o segundo projeto desenvolvido.

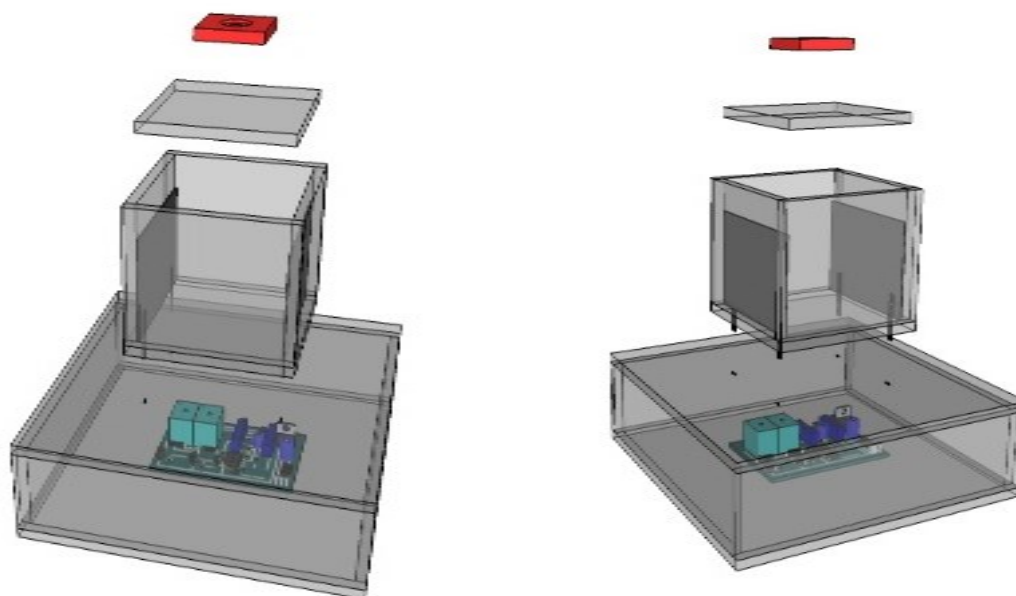


Figura 23 – Projeto do segundo protótipo.

Na Figura 23, as duas peças da parte superior (vermelha e cinza) foram desenvolvidas para serem utilizadas em conjunto com a prensa mecânica.

A célula de prova se manteve acima da caixa de encapsulamento do circuito eletrônico, assim como no primeiro protótipo. A célula de prova é ligada ao circuito por meio de conectores, também mostrados na Figura 23, de forma que a célula possa ser removida para limpeza, manutenção ou possível troca, bem como para facilitar a inserção do minério de ferro. Os eletrodos da célula (placas de metal galvanizado paralelas entre si) também são mostradas na Figura 23, sendo possível verificar que eles possuem alturas menores que as placas externas de acrílico. Essa diferença foi projetada para garantir que o minério sempre cobrirá completamente os eletrodos, independentemente da compactação realizada pela prensa.

Pode-se considerar que o efeito predominante do dielétrico acontece principalmente devido ao material localizado entre as placas, ou seja, o efeito da parte do minério que fica localizada acima das placas (cerca de 1 cm) pode ser desprezado. Porém, se o minério cobrisse apenas parcialmente as placas, o resultado seria influenciado pelo ar localizado entre elas. Essa foi uma das melhorias realizadas no segundo protótipo em relação ao primeiro.

5.2 Características importantes para desenvolvimento do protótipo

Para o desenvolvimento do protótipo, algumas características ou requisitos importantes foram definidos, e são listados a seguir:

- Ser alimentado por uma fonte de tensão de -9 V e +9 V;
- Fazer a leitura e conversões necessárias da temperatura da amostra e do circuito;
- Fazer a leitura e conversões necessárias da célula de carga para medir o peso da amostra, e, então, a densidade aparente;
- Fazer a leitura e conversões necessárias da umidade presente na amostra de minério inserida no sensor;
- Prover uma interface de comunicação USB.

A Figura 24 mostra um diagrama funcional do sistema com as principais funcionalidades, sem detalhamento interno de cada um.

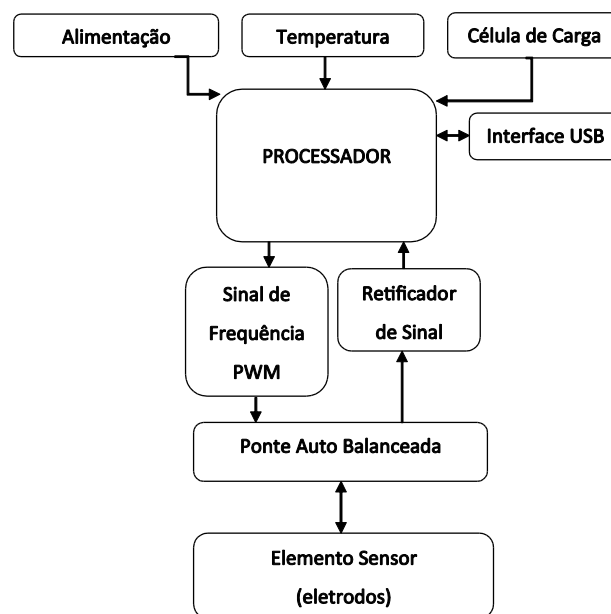


Figura 24 – Diagrama funcional do sistema.

5.3 Desenvolvimento do hardware

Para o desenvolvimento do circuito baseado em ponte autobalanceada, foi utilizado o microcontrolador PIC18F25K80, da Microchip, como a central de geração de sinais e processamento dos dados para medir a impedância da célula de prova. Além disso, foi desenvolvido o circuito de alimentação, medição de temperatura, medição de peso (por meio

de célula de carga), e o circuito para a comunicação do sistema com um microcomputador através de comunicação sem fio, utilizando o módulo X-Bee, que utiliza a porta USB como interface de comunicação. As seguintes características ou requisitos foram definidos para o desenvolvimento do hardware:

- Prover entrada para uma fonte de tensão contínua de -9 V e +9 V e fazer as devidas conversões para +5 V e -5 V;
- Conter o circuito necessário com as devidas conversões, ampliações e filtros para a medição da temperatura por meio de um sensor LM35;
- Conter o circuito necessário para as devidas conversões, ampliações e filtros para a medição da célula de carga;
- Conter o circuito necessário para correto funcionamento do microcontrolador PIC18F25k80 da Microchip;
- Conter o circuito necessário com as devidas conversões, ampliações e filtros para a recepção e transmissão do sinal de frequência PWM do microcontrolador ao elemento sensor;
- Conter o circuito necessário com as devidas conversões, ampliações e filtros para a recepção do sinal de frequência de saída do elemento sensor após excitado com o sinal gerado pelo microcontrolador;

Para a ponte autobalanceada foi utilizado o amplificador operacional ADA4817. O desafio nessa etapa foi definir o resistor R_f (sendo $R_f = G_f^{-1}$) e o capacitor C_f de acordo com o elemento sensor desenvolvido (este possui resistência $R_x = G_x^{-1}$ e capacitância C_x , de acordo com o circuito mostrado na Figura 17), e para atender as limitações de geração de sinal de frequência do microcontrolador de até 16 MHz. Existem diversas combinações possíveis, porém são reduzidas a milhares quando definidos os valores comerciais disponíveis.

Para encontrar o resistor R_x e o capacitor C_x , foram elaboradas e utilizadas amostras de substâncias com valores de constante dielétrica relativa de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Constantes dielétricas relativas das amostras utilizadas no experimento

	Constante dielétrica relativa - ϵ_r
Ar	1
Água destilada	80
Água potável	80
Álcool	25
Água + cloreto de sódio 1	80
Água + cloreto de sódio 2	80
Água + cloreto de sódio 3	80
Água + álcool 1	38,75
Água + álcool 2	52,5
Água + álcool 3	66,25

Os valores de R_x e C_x para as amostras elaboradas foram encontrados com auxílio de uma planilha desenvolvida no Excel e por meio do modo de varredura de frequência desenvolvido no firmware do microcontrolador, em que a frequência do sinal de entrada do circuito pode ser variada entre 4 kHz até 16 MHz.

Foram utilizadas 13 frequências diferentes para a varredura. Dessa forma, o ganho do circuito para cada frequência e para cada amostra foi inserido na planilha para verificação das frequências de corte e dos patamares encontrados.

A planilha desenvolvida simula a varredura de frequência de 4 kHz a 16 MHz para cada amostra (considerando cada R_x e C_x medido) e exibe um gráfico com o ganho do circuito para um R_f e C_f definidos. Dessa forma, variou-se a combinação de R_f e C_f de diversas formas, verificando no gráfico as frequências de corte f_1 e f_2 , que deveriam estar dentro da faixa de 4 kHz e 16 MHz, e os ganhos A_1 e A_2 , que deveriam ficar próximos de 2, já que o microcontrolador tem sua faixa de tensão limitada de 0 a 5 V para entrada e saída. Logo, ganhos muito altos levariam o circuito à saturação.

Por último, buscou-se uma configuração que proporcionasse A_1 e A_2 de forma bem definida e distinta. Os dois patamares (ganhos) e as frequências de corte são mostrados em detalhes na Figura 25.

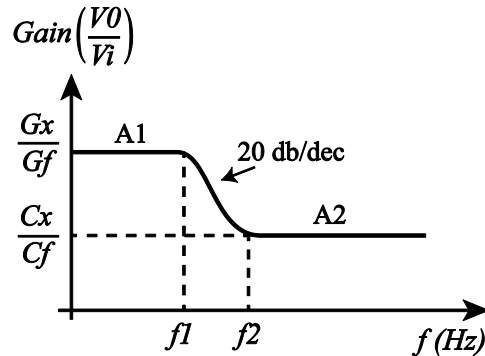


Figura 25 – Resposta em frequência do circuito mostrando as frequências de corte.

As frequências de corte f_1 e f_2 podem ser calculadas de acordo com as equações 38 e 39:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_f C_f} , \quad (38)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_x C_x} . \quad (39)$$

O projeto da PCB foi desenvolvido utilizando o software ARES. Já as simulações foram realizadas utilizando-se o software ISIS. A PCB foi concebida utilizando um fresadora CNC. Outro detalhe muito importante levado em consideração foi o ganho de saída do sinal de alimentação do sensor, já que o circuito é limitado de 0 a 5 volts, e foi utilizado um conversor A/D de 12 bits, que fornece uma resolução de 0,00122 volts.

5.4 Desenvolvimento do firmware e do software supervisor

O *firmware*, que é o software embarcado no microcontrolador PIC18F25k80, foi desenvolvido para ser compilado utilizando-se o PCWHD v.4.078. O software supervisor foi desenvolvido, utilizando-se o Visual C#, para ser executado em um microcomputador e comunica via USB com o circuito de aquisição e exibe as informações importantes ao usuário.

Para o desenvolvimento do *firmware* os seguintes estados foram definidos:

- automático: neste estado, o *firmware* deve receber, através das portas analógicas, os sinais de temperatura, da célula de carga e do sinal de saída do elemento sensor e enviar através da porta USB as informações para o software supervisor. Esse é o estado em que o circuito se encontra no seu funcionamento normal ou calibração;
- varredura: neste estado o *firmware* deve gerar sinais de frequência através de pulsos PWM, variando a frequência automaticamente entre 4 kHz e 16 MHz e fazer a leitura analógica do sinal de saída do elemento sensor. Esse estado é importante para a definição da resistência e do capacitor R_f e C_f .

Já para o desenvolvimento do software supervisor, foram definidas as seguintes características para execução:

- O software deve fornecer uma interface amigável para o usuário;
- O software deve comunicar com o hardware ou *firmware* através de uma comunicação sem fio;
- O software deve fornecer interface para que o usuário possa escolher entre os diferentes estados do *firmware*, através de botões;
- O software deve receber os dados através da USB e salvar em uma base de dados e disponibilizar esses dados de histórico ao usuário;
- O software deve fazer todos os filtros necessários e exibir os dados recebidos do *firmware* em gráficos organizados e objetivos;
- O software deve utilizar os seguintes filtros de dados:
 - Média móvel;
 - Critério de Chauvenet para eliminação de *outliers*;
 - Cálculo do desvio padrão dos dados;
- O software deve ser capaz de enviar dados de acordo com a necessidade do usuário, através de um campo de texto manual, para possíveis testes ou configurações durante o processo de desenvolvimento;
- O software deve ser capaz de conectar ao hardware em diferentes portas USB, para disponibilizar a opção de conexão com diferentes dispositivos ou em diferentes portas;

Após o desenvolvimento do hardware, do *firmware* e do software, o sistema está preparado para o processo de calibração.

5.5 Experimento I

O primeiro experimento foi desenvolvido para correlacionar a resposta do sensor com a umidade através de um processo de secagem e pesagem de forma contínua ao longo do tempo. Uma amostra de minério completamente saturada em relação à umidade foi inserida em uma estufa juntamente com uma balança, que mediu as variações do peso da amostra ao longo do tempo, conforme o minério foi secando. A resposta do sensor também foi monitorada.

O método para o primeiro experimento foi dividido da seguinte forma:

- Calibrar o sensor (célula de prova);
- Calibrar a célula de carga;
- Saturar completamente a umidade em uma amostra de minério de ferro;
- Secar continuamente a amostra em uma estufa programada, medindo o peso da amostra e a resposta do sensor;
- Correlacionar a variação da umidade com a resposta do sensor.

Cada etapa é descrita com detalhes a seguir.

5.5.1 Calibração do sensor

Inicialmente foi realizada a calibração do sensor utilizando amostras com valores conhecidos de constante dielétrica relativa (ϵ_r).

As amostras foram elaboradas a partir da mistura de volumes conhecidos de água e cloreto de sódio (NaCl), para que as amostras mantivessem a constante dielétrica fixa, porém com diferentes condutividades. Também foram elaboradas amostras misturando-se água e álcool, a fim de variar, neste caso, a constante dielétrica entre as amostras.

As amostras de água e álcool foram preparadas variando o volume de cada substância, tendo valores conhecidos da constante dielétrica relativa por meio de uma média ponderada (a água tem constante dielétrica relativa de 80 e o álcool 25 a 20°C).

5.5.2 Calibração da célula de carga

Para o primeiro experimento, foi desenvolvida uma balança com suporte em madeira utilizando uma célula de carga. Inicialmente a balança foi calibrada utilizando pesos padrões de 100 g, 200 g, 300 g, 500 g, 600 g, 700 g, 800 g.

Foi utilizado um pequeno cabo de aço e uma chapa de acrílico, conectados à célula de carga, exercendo a função de uma balança. Todas as medições foram feitas em uma sala fechada a aproximadamente 22 graus Celsius, controlada por um ar condicionado.

5.5.3 Saturação da amostra e secagem do minério

Para a secagem do minério e o acompanhamento do processo, foi utilizada uma amostra de minério completamente úmida.

A amostra foi saturada utilizando um tubo PVC aberto nas duas extremidades. Uma rede de proteção foi inserida na parte inferior e a mostra de minério foi inserida no tubo através da parte superior. A parte inferior do tubo com a rede foi inserida em uma bacia com água, de forma que a água pôde saturar naturalmente a amostra, devido às forças capilares presentes, tornando a amostra completamente saturada, mas ao mesmo tempo sem excessos de água. O processo de saturação realizado dessa forma ocorre naturalmente e demora cerca de 2 a 3 horas. A Figura 26 mostra o tubo PVC utilizado durante o procedimento de saturação da amostra de minério de ferro.

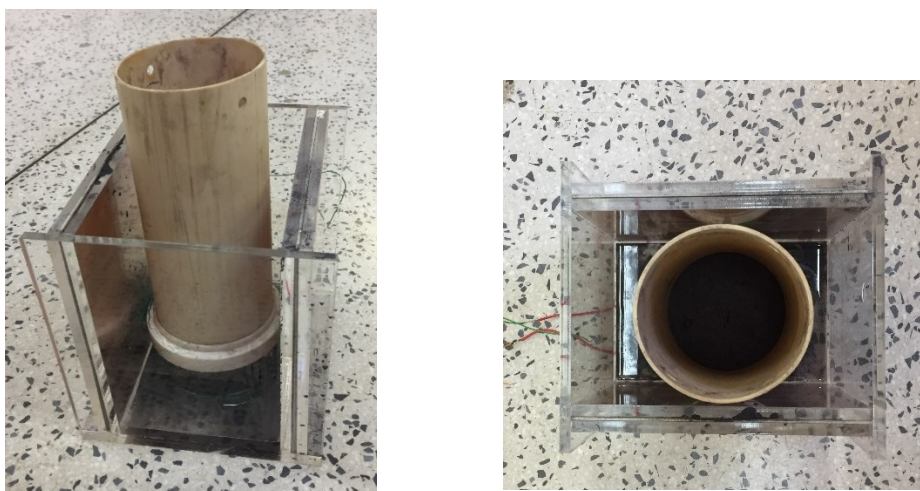


Figura 26 – Amostra sendo completamente saturada.

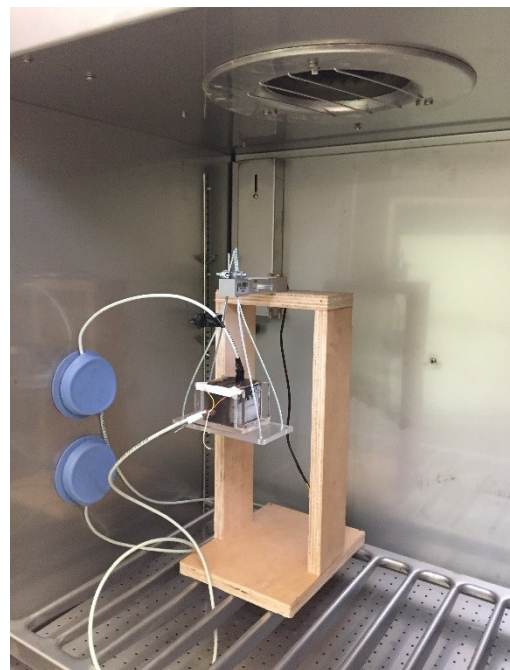
A amostra completamente saturada foi colocada em uma estufa programada, juntamente com a balança, também desenvolvida durante a pesquisa exclusivamente para este trabalho a fim de avaliar a variação da massa do minério durante o processo de secagem. A programação da estufa foi realizada para mantê-la em um *loop* de 2 h e 30min em 25 °C e 2 h e 30 min em 60 °C, com umidade relativa do ar controlada a 30% por meio de um ar condicionado instalado no local. Esse processo se manteve até que a amostra secasse, e durou cerca de 5 dias. A influência da temperatura no sistema não foi estudada e levada em consideração.

A amostragem do valor fornecido pelo sensor, bem como pela balança, foi realizada a cada 2 min. Após o experimento, o minério foi colocado para secar na estufa, a 100 °C, no período de 24 h, e em seguida foi pesado. Essa é então a massa do minério seco, de acordo com o método gravimétrico padrão.

Com essa metodologia, foi possível realizar a aquisição dos dados de umidade em peso do minério através do sinal de saída do sensor, de forma automática e contínua, durante o processo de secagem. A Figura 27 mostra duas fotos, uma da estufa utilizada (a) e a outra da amostra de minério dentro da célula de prova colocada na balança (b).



(a)



(b)

Figura 27 – (a) Estufa programada; e (b) amostra na balança desenvolvida.

5.6 Experimento II

Os resultados do experimento I não foram completamente satisfatórios devido à baixa precisão do sistema de pesagem, bem como à influência da temperatura na célula de prova. Logo, buscou-se utilizar outra metodologia: em vez de se secar uma amostra continuamente no tempo, foram criadas várias amostras com diferentes umidades conhecidas. Dessa forma, pode-se obter e validar, empiricamente, o modelo matemático para correlacionar a resposta do sensor com a umidade esperada.

O experimento II foi dividido nas seguintes etapas: elaboração das amostras com diferentes umidade conhecidas e inserção das amostras no sensor e coleta das respostas.

5.6.1 Elaboração das amostras com diferentes umidades

Foram preparadas 9 amostras de minério de ferro com diferentes umidades na faixa entre 4% e 22%, valores que abrangem a faixa de interesse para processos de mineração (4% a 13%), por meio do método gravimétrico padrão. Todas as 9 amostras foram criadas a partir de uma mesma amostra de minério de ferro, com teor de ferro e granulometria predominante desconhecidos.

As amostras criadas foram secas a 100 °C por 24 h, de acordo com o método padrão. Logo após, cada amostra foi pesada e misturada com a quantidade correta de água, para que as amostras contivessem as umidades de interesse. Como dito anteriormente, a secagem em estufa é um método destrutivo, já que as amostras secas têm suas estruturas perturbadas.

Foram utilizadas uma balança de precisão e um misturador ultrassônico Sanoblin Sonorex Super RK106 para o processo de homogeneização das amostras que continham mistura de minério e água. Cada amostra foi homogeneizada por 5 minutos. Para o processo de pesagem, utilizou-se a balança de precisão Bioprecisa BS 3000A. A Figura 28 mostra os equipamentos utilizados no processo de elaboração das amostras.



Figura 28 – Processo de elaboração das amostras.

As 9 amostras preparadas de minério com umidade em peso conhecidas foram de: 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18% e 20%.

5.6.2 Inserção das amostras no sensor

Cada amostra foi inserida no elemento sensor, mantendo-se o mesmo volume. Foram efetuadas, então, automaticamente, 10 leituras para cada amostra, calculada a média dessas 10 leituras, retirados os *outliers* de acordo com o critério de Chauvenet e, então, o valor da média dessas leituras fornecidas pelo sensor foi considerado o valor do resultado final. As medições já foram feitas com todas as conversões necessárias para prover os valores em porcentagem de umidade em peso, de acordo com o modelo matemático desenvolvido, empiricamente, durante a calibração.

5.6.3 Validação do modelo

Após a inserção das amostras no sensor e a elaboração do modelo matemático que correlaciona a umidade e a constante dielétrica relativa, fornecida pelo sensor, a fim de validar o modelo encontrado, novas amostras foram elaboradas, com diferentes valores de umidade e não utilizados no processo de calibração do sensor. Foram elas, em umidade: 5%, 7%, 9%, 11% e 13%. Essas amostras também foram criadas a partir da mesma amostra maior de minério utilizada anteriormente com teor de ferro e granulometria desconhecidos. Essas novas amostras foram inseridas uma a uma no sensor e, dessa forma, foi possível analisar o erro no resultado fornecido, comparando o valor esperado da umidade da amostra e o valor fornecido pelo sensor.

5.7 Experimento III

Para o terceiro e último experimento, a metodologia foi similar ao experimento II, porém, ela foi modificada para analisar a influência da densidade aparente do minério, por meio da mudança de compactação no sensor, bem como a influência da granulometria e do teor de ferro das amostras.

Para a análise da densidade do minério, foi utilizada uma prensa mecânica para variar a compactação do minério a partir da entrada superior do sensor e também uma célula de carga para medir essa pressão exercida pela prensa, instalada na parte externa inferior do sensor. Para tornar possível a utilização da prensa mecânica e da célula de carga, o segundo protótipo foi utilizado.

O experimento III é detalhado nos tópicos a seguir.

5.7.1 Elaboração das amostras com diferentes umidades, ferro e granulometria

Novas amostras foram solicitadas à Fundação Gorceix, caracterizadas em relação ao teor de ferro e à granulometria. Foram fornecidas 7 amostras diferentes. Porém, a granulometria apresentada nas amostras, identificadas com peneiras com diferentes aberturas, foi muito heterogênea, tendo uma grande variação, entre 20 μm e 6300 μm . Como não foi possível obter amostras com valores de granulometria fixos para todas as amostras ou com uma faixa menor de variação, a granulometria foi parcialmente desconsiderada para este trabalho, tendo sido possível fazer, apenas parcialmente, o estudo de sua influência no modelo final geral. A influência da densidade aparente na resposta do sensor foi estudada através da utilização da prensa mecânica e diferentes níveis de compactação.

A granulometria máxima utilizada durante os experimentos foi de 6300 μm . Logo, pode-se dizer que este trabalho apresenta resultados para minérios finos. Já o teor de ferro e sílica para cada amostra foi caracterizado em laboratório. Os resultados são mostrados na Tabela 4. A numeração das amostras não segue uma ordem específica, como é possível ser verificado na tabela. Isso ocorre pois, inicialmente, foram fornecidas 20 amostras pela Fundação Gorceix, porém, foram caracterizadas 14 dessas 20.

Foram escolhidas as amostras com a maior quantidade de minério dentre as 14 amostras caracterizadas, para tornar possível a criação de outras amostras com diferentes umidades para cada amostra caracterizada.

Foi escolhido manter a numeração original das amostras neste trabalho a fim de facilitar a manipulação da grande quantidade de dados, organizados de acordo com a numeração original das amostras fornecidas.

Tabela 4 – Amostras Caracterizadas

	Ferro (% Fe)	Sílica (% SiO ₂)	Granulometria média (µm)
Amostra 6	33,25	51,49	243,52
Amostra 7	51,74	24,94	836,38
Amostra 11	45,51	30,62	772,95
Amostra 13	8,03	87,04	118,01
Amostra 14	67,20	1,72	54,45
Amostra 15	64,03	6,96	99,83
Amostra 19	50,22	25,88	52,83

Para cada uma das amostras, foram elaboradas outras 5 amostras com diferentes umidades, similar ao desenvolvido no experimento II.

As amostras foram secas durante 24 h a 100 °C e, então, foram preparadas com 4%, 6%, 8%, 10% e 13% de umidade em peso, totalizando 35 amostras diferentes.

Neste experimento as amostras foram homogeneizadas a mão, com a utilização de luvas, durante cerca de 5 minutos cada.

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos para que a umidade se mantivesse constante e bem distribuída.

5.7.2 Inserção das amostras no sensor

Cada uma das 35 amostras foi cuidadosamente inserida no sensor. Para cada mudança de uma amostra para a outra, o sensor foi limpo com água destilada e seco.

Primeiramente foi realizado a calibração do sensor similarmente ao procedimento realizado no experimento I a fim de correlacionar a constante dielétrica com o ganho do sensor.

Para a análise da influência da compactação do minério, foi utilizada uma prensa mecânica e uma célula de carga na parte externa inferior do sensor, para medir a pressão exercida pela prensa. Porém, a célula de carga utilizada, que suportava um peso máximo de 23 kg acabou sendo danificada, visto que a prensa exerceu um peso não esperado, maior que os 23 kg. Logo a célula de carga foi excluída do experimento. Posteriormente, para determinação da densidade aparente das amostras, utilizou-se uma balança.

Para a análise da influência da compactação, foram definidos diferentes níveis de altura do minério dentro do sensor, onde o minério deveria se estabelecer em diferentes níveis com o auxílio da prensa mecânica. As medições foram feitas individualmente para cada um desses níveis. Para a definição dos níveis, foi fixado no sensor uma escala milimétrica. Dessa forma, cada uma das 35 amostras foram inseridas na célula e a prensa mecânica foi utilizada para compactar o minério até um dos níveis.

Após as medidas serem realizadas pelo sensor, a prensa compactava ainda mais o minério, até o próximo nível, e novamente o sensor realizava as medições, e assim sucessivamente. Para cada uma das amostras realizadas nos diferentes níveis, foram realizadas 50 medições. Todos os diferentes níveis foram definidos acima da altura das placas dos eletrodos, garantindo que o minério cobrisse completamente as placas em todos os níveis.

Os *outliers* foram excluídos com a utilização do critério de Chauvenet, e o resultado final para cada nível de compactação foi considerado a média calculada dos valores lidos pelo sensor. Assim como nos outros experimentos, todo o processo de leitura e processamento dos dados foi realizado automaticamente pelo software supervisor.

Todas as amostras foram pesadas antes de serem inseridas no sensor, para tornar possível o cálculo da densidade aparente da amostra, já que o volume é conhecido de acordo com o nível de compactação e as dimensões do sensor, também conhecidas. Após a aquisição de todos esses dados para todas as amostras e compactações, foi estudado como cada variável levada em conta para este trabalho influencia a resposta do sensor, sendo elas a umidade, a densidade aparente do minério e o teor de ferro. Após essa análise, foi elaborado um modelo que relaciona o teor de ferro, a umidade e a densidade aparente do minério com a resposta do sensor. Como a variável de interesse para este trabalho é a umidade, ela foi isolada no modelo.

5.7.3 Validação do modelo

Similarmente ao experimento II, para o processo de validação do modelo matemático encontrado, novas amostras foram elaboradas com valores de umidades conhecidos e não utilizados no processo de calibração do sensor (5%, 7%, 9% e 11%). Dessa forma, foi possível analisar o erro de leitura fornecido pelo sensor.

Para o processo de validação, as amostras com umidade conhecidas foram elaboradas para cada uma das amostras 6, 7, 13, 15 e 19, que apresentam diferentes teores de ferro. Novamente para cada uma das novas 20 amostras, foi realizado o mesmo processo de compactação como explicado anteriormente. Dessa forma, foi possível comparar a resposta da umidade fornecida pelo sensor, de acordo com o modelo desenvolvido, e o valor esperado conhecido das amostras, sendo a diferença entre eles, o erro.

Fram criados, então, os gráficos de erros para analisar o desempenho do sensor. Para cada nível de compactação de cada amostra, foram realizadas 10 leituras e o desvio padrão foi calculado para verificar a dispersão dos dados. O desvio padrão foi considerado no gráfico de erros para exibir a faixa esperada de erro aleatório fornecida pelo sensor, para cada umidade. A faixa considerada foi de $\pm 2,262$ desvios padrões, visto que, de acordo com a tabela de *t-student* para 10 amostras (9 graus de liberdade), este é o fator que deve ser utilizado para garantir que, com 95% de probabilidade, o valor lido estará dentro dessa faixa. Esse intervalo no qual se espera o erro aleatório pode ser utilizado para avaliar a precisão do sensor. Como para cada amostra foram feitas diferentes compactações, para não serem gerados diferentes gráficos de erros para cada compactação, a compactação e a resposta do sensor considerada foram as médias dos valores. Neste caso, utiliza-se o desvio padrão da média, definido como o desvio padrão dividido pela raiz quadrada do número medições utilizadas para calcular a média.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a definição da metodologia e a execução dos experimentos, os resultados foram analisados e discutidos neste capítulo. Os resultados foram organizados e discutidos separadamente de acordo com a metodologia apresentada anteriormente.

6.1 Os protótipos

O primeiro protótipo do elemento sensor desenvolvido ficou compacto, de forma que não foram necessárias grandes amostras de minério para a realização dos testes.

A pequena caixa de acrílico com as placas galvanizadas não apresentou nenhum vazamento de água ou minério.

Os fios que conectam os eletrodos ao circuito foram soldados na parte superior das placas internamente.

A Figura 29 mostra duas fotos do protótipo, uma vazia (a) e outra com uma amostra de minério úmida (b).

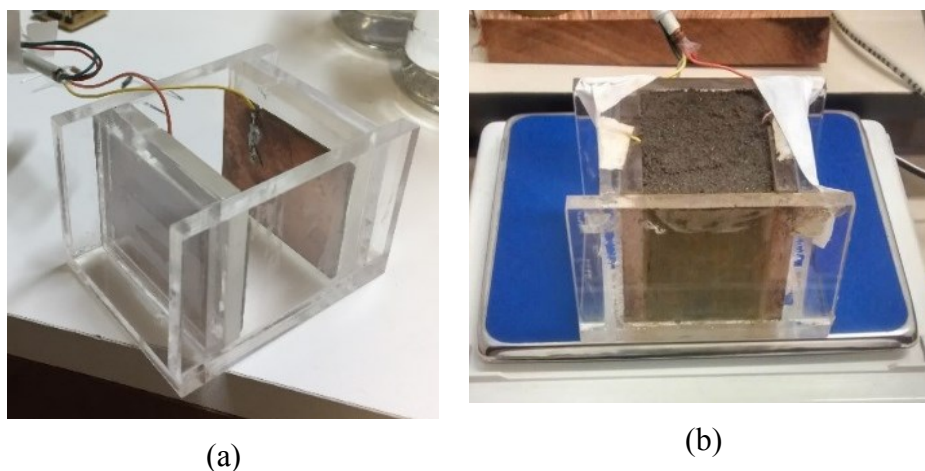


Figura 29 – (a) Primeiro protótipo desenvolvido vazio e (b) com amostra de minério inserida.

O segundo protótipo foi desenvolvido possibilitando a utilização de uma prensa mecânica para compactar o minério, bem como a instalação de uma célula de carga na parte externa inferior para medir a pressão exercida pela prensa. Os eletrodos do novo protótipo foram desenvolvidos já com um corte específico para funcionar como conectores para comunicar com o circuito, o que representa uma melhoria do segundo protótipo em relação ao primeiro.

Na Figura 30 mostra-se o segundo protótipo desenvolvido, sendo possível visualizar os novos conectores na parte inferior.

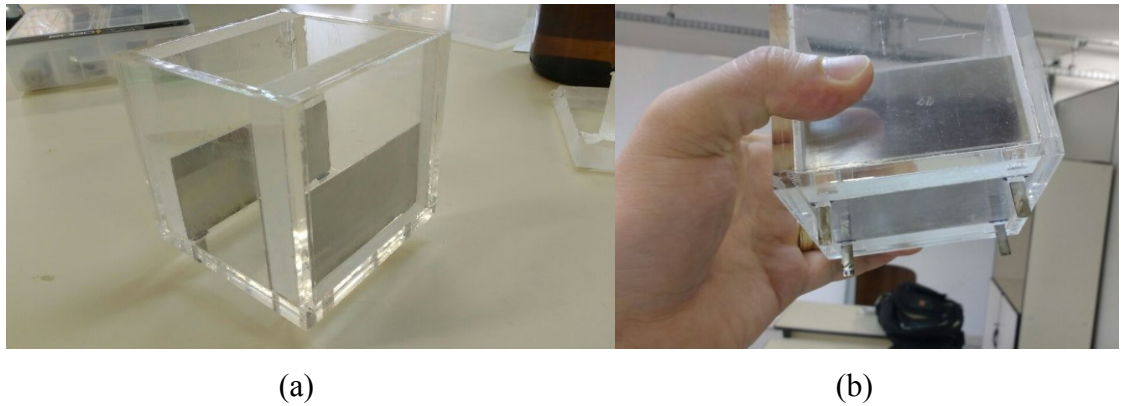


Figura 30 – Segundo protótipo desenvolvido.

De acordo com a Figura 30(a), é possível verificar que os eletrodos ficaram menores para possibilitar a compactação do minério dentro do sensor, bem como os novos conectores dos eletrodos para conectar ao circuito de geração e processamento dos sinais.

Na Figura 31 mostra-se o sensor preparado com a prensa mecânica (sem a tampa superior do sensor), que faz a compactação do minério utilizando uma tampa de acrílico. A figura também mostra a célula de carga na parte inferior do sensor, utilizada inicialmente. É possível visualizar os cabos blindados que tornam possível a comunicação entre o sensor e o circuito de processamento, localizado no fundo da imagem.

A balança semianalítica mostrada foi utilizada para a pesagem das amostras, visto que a célula de carga foi danificada.

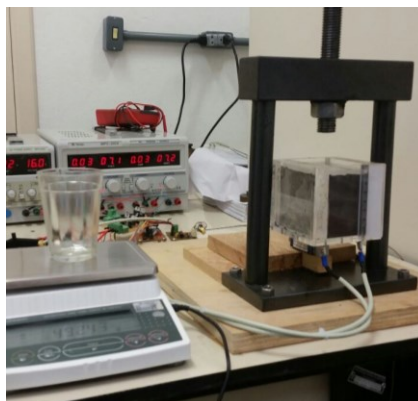


Figura 31 – Segundo protótipo desenvolvido com a prensa mecânica, célula de carga e o circuito de processamento.

6.2 O hardware

A planilha desenvolvida em Excel foi importante para a melhor escolha do resistor R_f e do capacitor C_f . Para diferentes combinações, diferentes gráficos gerados foram analisados.

Na Figura 32 mostra-se o gráfico simulado para os seguintes valores para $R_f = 1\text{k}\Omega$ e $C_f = 100\text{pF}$:

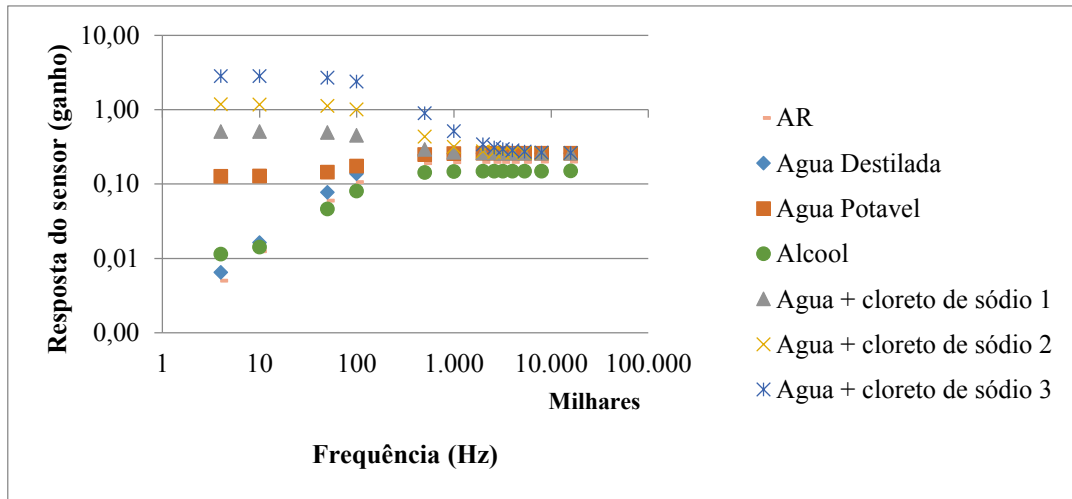


Figura 32 – Simulação para a varredura de frequência.

Aumentando-se R_f de $1\text{k}\Omega$ para $10\text{k}\Omega$ pôde-se verificar resultados insatisfatórios, visto o alto ganho encontrado no primeiro patamar. A Figura 33 mostra o resultado para a nova simulação.

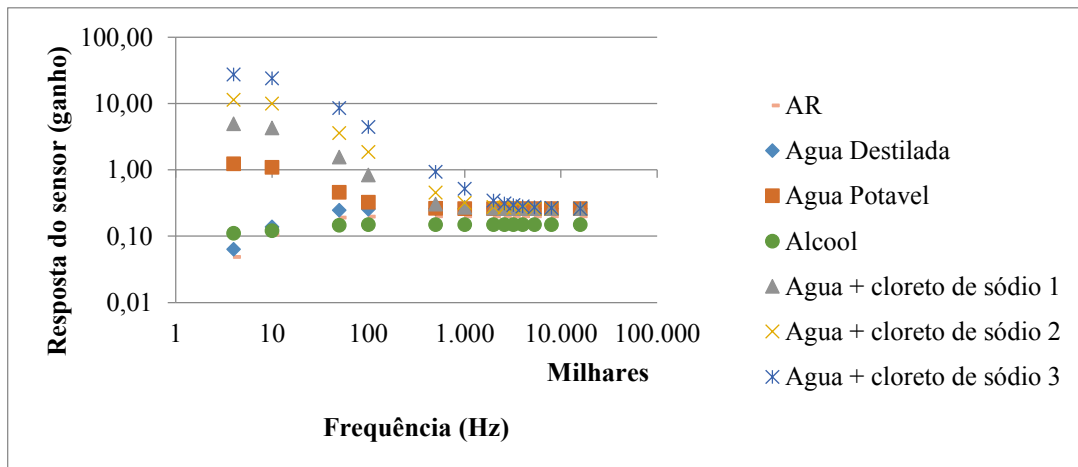


Figura 33 – Simulação para a varredura de frequência com novos valores.

Após diversos testes para diferentes combinações para R_f e C_f , foram encontrados valores adequados, bem como as frequências de corte f_1 e f_2 adequadas para o sistema desenvolvido.

- $R_f = 1 \text{ k}\Omega$;
- $C_f = 100 \text{ pF}$;
- $f_1 = 400 \text{ kHz}$;
- $f_2 = 5,33 \text{ MHz}$.

O hardware foi desenvolvido utilizando-se o software PROTEUS, para o projeto e simulação e o software ARES para o desenho da PCB, como mostrado na Figura 34.

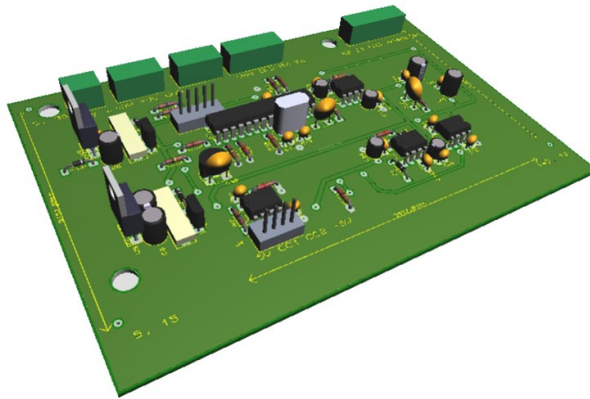


Figura 34 – PCB desenvolvida no software ARES.

A PCB foi desenvolvida utilizando-se uma CNC disponível no Laboratório de Controle e Automação Multiusuário da Universidade Federal de Ouro Preto, como é mostrado na Figura 35.

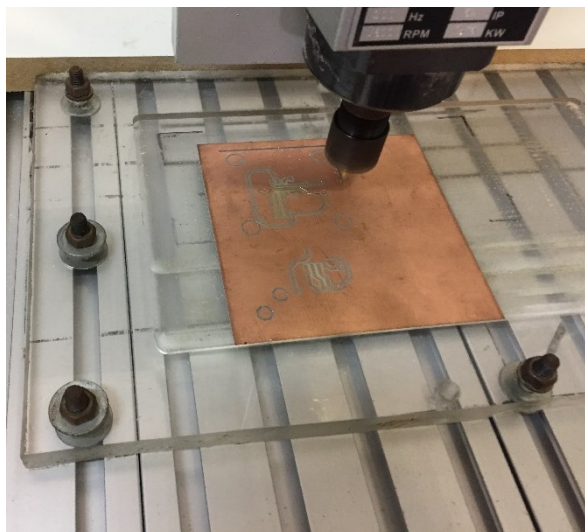


Figura 35 – Elaboração da PCB utilizando a CNC.

Na Figura 36 mostra-se o circuito montado com todos os componentes soldados e conectados com a fonte de alimentação, bem como o dispositivo de comunicação sem fio XBee, ao fundo.

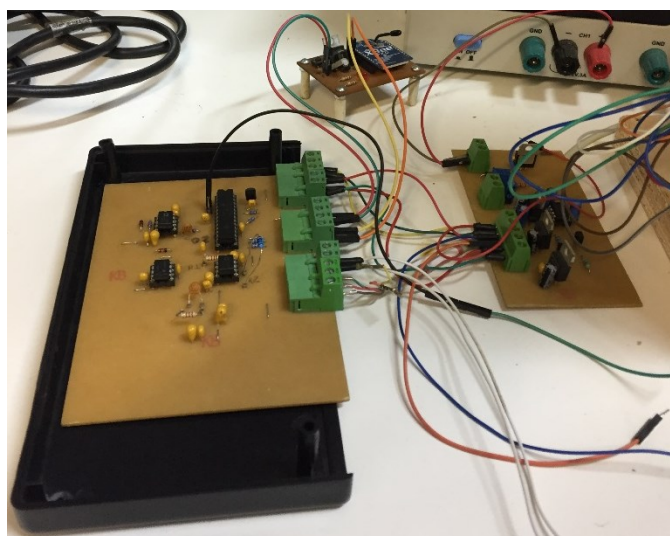


Figura 36 – Circuitos desenvolvidos.

6.3 O firmware e o software supervisor

O *firmware* foi gravado no microcontrolador e funcionou corretamente no hardware desenvolvido, comunicando com o módulo XBee, gerando os sinais de frequência ao elemento

sensor e fazendo todas as leituras de modo adequado (ganho de tensão do circuito, temperatura e célula de carga).

O software supervisor, por sua vez, comunicou-se perfeitamente com o hardware, utilizando-se também o XBee. Todos os comandos foram enviados corretamente e os dados foram recebidos de forma positiva. Os gráficos gerados e a base de dados também funcionaram de modo adequado.

A Figura 37 mostra a tela inicial do software supervisor.

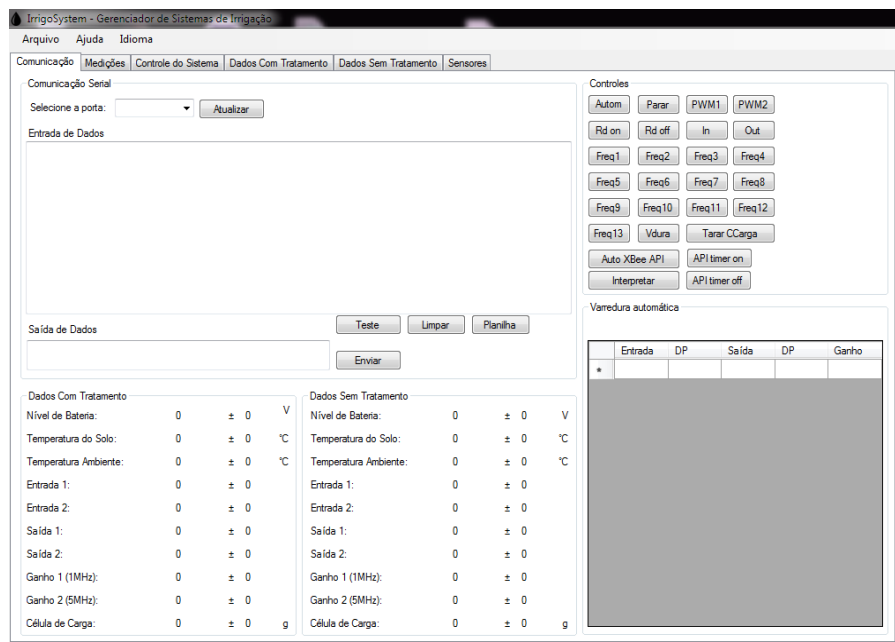


Figura 37 – Software supervisor.

6.4 Experimento I

6.4.1 Calibração do sensor

A resposta real do sistema para o resistor e o capacitor escolhidos é mostrada na Figura 38. Claramente, para frequências maiores que 5 MHz, o sistema começa a sofrer distúrbios resultantes de ruídos e interferências comuns em sistemas de alta frequência. Esse efeito foi diminuído por meio do uso de um cabo blindado. Além disso, sugere-se o uso de conectores blindados para melhorar ainda mais o resultado em trabalhos futuros. Como a frequência de

corde f_2 escolhida foi de 5,33 MHz, o circuito se comportou de forma positiva para frequências abaixo desse valor, não sendo então um problema para a elaboração do modelo matemático.

Foi utilizado um amplificador operacional especial que trabalha dentro da faixa de frequência especificada e que fornece o ganho projetado através da realimentação (AD8056).

Após exaustivos ensaios, o melhor ganho encontrado foi de 0,31 através da escolha dos resistores $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 680 \Omega$.

Na Figura 38 mostra-se a resposta em frequência real do circuito após todas as definições e montagens como citado acima.

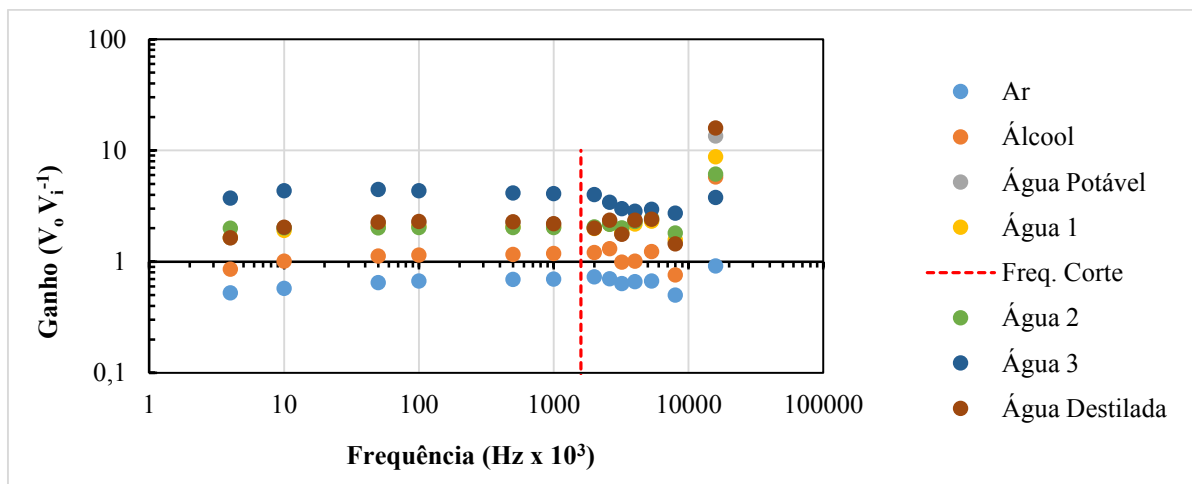


Figura 38 – Resposta em frequência real do circuito.

A resposta foi como se esperava de acordo com os dados utilizados para gerar o modelo matemático, validando os valores dos resistores, do capacitor e das frequências de corte escolhidas. Na Figura 39 exibe-se o modelo encontrado para esses testes iniciais para a constante dielétrica relativa e o ganho do circuito projetado.

Os pontos exibidos na Figura 39 são referentes ao ganho do circuito para cada amostra com o sinal de alta frequência (5,33 MHz). Uma regressão linear simples foi suficiente para descrever matematicamente os pontos encontrados. Ambos os resultados tiveram alta correlação conforme mostra o coeficiente de determinação (R^2).

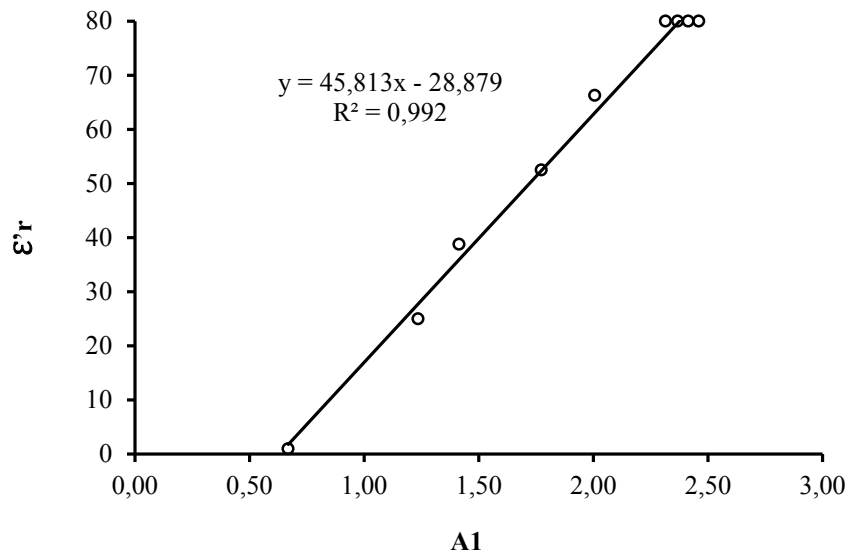


Figura 39 – Relação entre a constante dielétrica relativa e o ganho do circuito de medição.

Todo o processo foi auxiliado por meio de um microcomputador que comunica com o sistema por meio de uma conexão via USB, utilizando-se os dispositivos XBee para comunicação sem fio.

6.4.2 Calibração da célula de carga

Após inserir os pesos conhecidos na célula de carga, foi feita a aquisição dos dados para cada peso e os dados foram organizados no software Excel e uma regressão linear foi aplicada. O modelo linear representou bem os dados aferidos e, então, o modelo foi aceito. O resultado da calibração da célula de carga é apresentada na Figura 40.

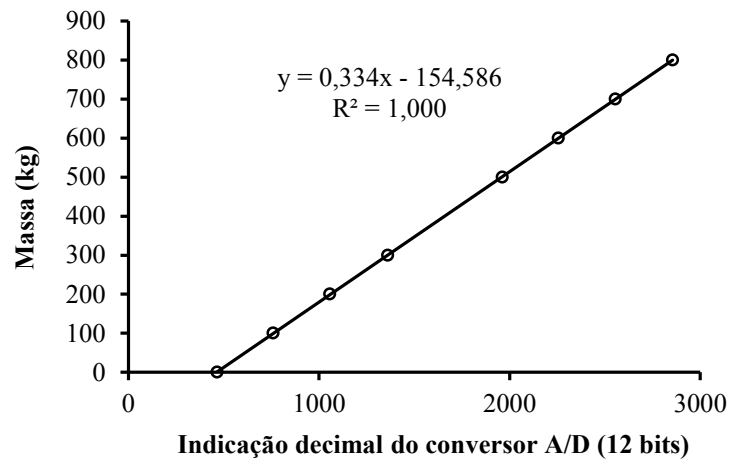


Figura 40 – Calibração da balança desenvolvida.

6.4.3 Secagem do minério

Após a secagem do minério, verificou-se que os resultados não foram satisfatórios devido à imprecisão da célula de carga utilizada na balança. Porém, os resultados mostraram que os valores fornecidos pelo sensor realmente acompanharam a variação da constante dielétrica relativa, de acordo com a diminuição da água na amostra.

O efeito da temperatura tanto no sensor quanto na balança também influenciou negativamente o resultado.

Na Figura 41 mostra-se o resultado da variação da constante dielétrica relativa ao longo tempo.

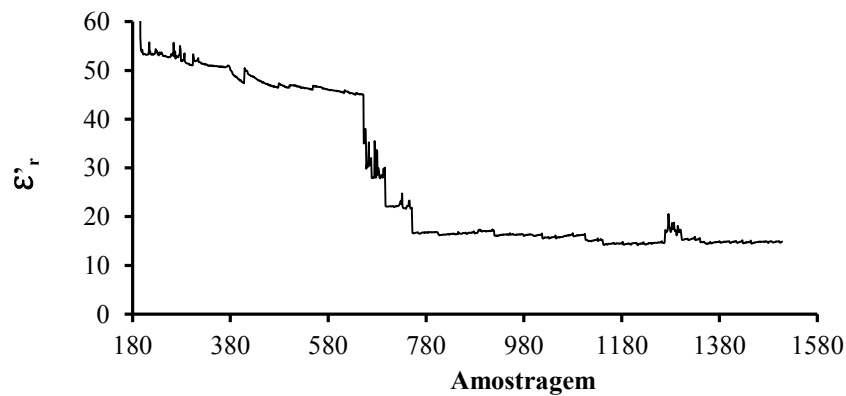


Figura 41 – Variação da constante dielétrica ao longo tempo utilizando a estufa.

A Figura 42 mostra a grande variação do resultado onde a constante dielétrica relativa foi menor que 20, devido à variação da temperatura (25° C e 60° C) e à imprecisão da célula de carga quando submetida a temperatura variável.

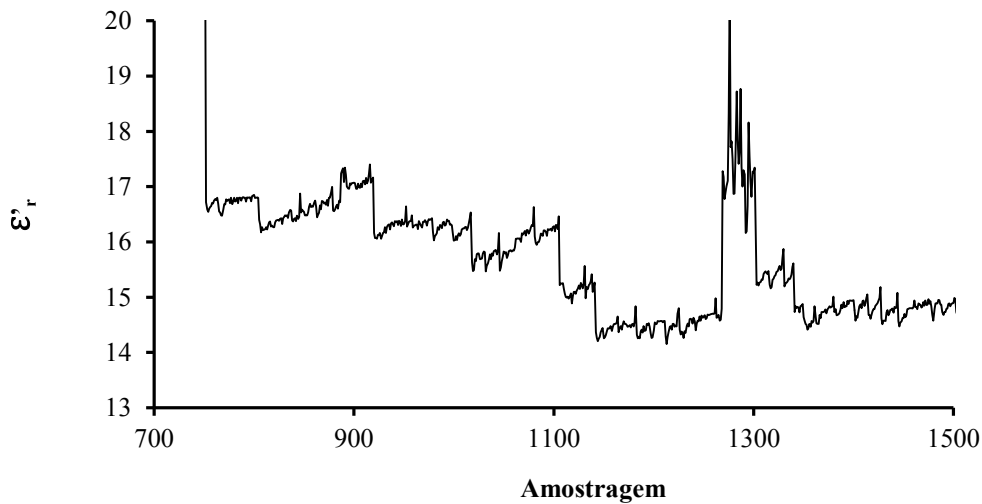


Figura 42 – Grande variação no resultado devido à influência da temperatura e à imprecisão da célula de carga.

A Figura 43 exibe os algumas amostragens durante a secagem de forma aproximada. A grande variação que ocorre devido aos fatores citados anteriormente é claramente exibida.

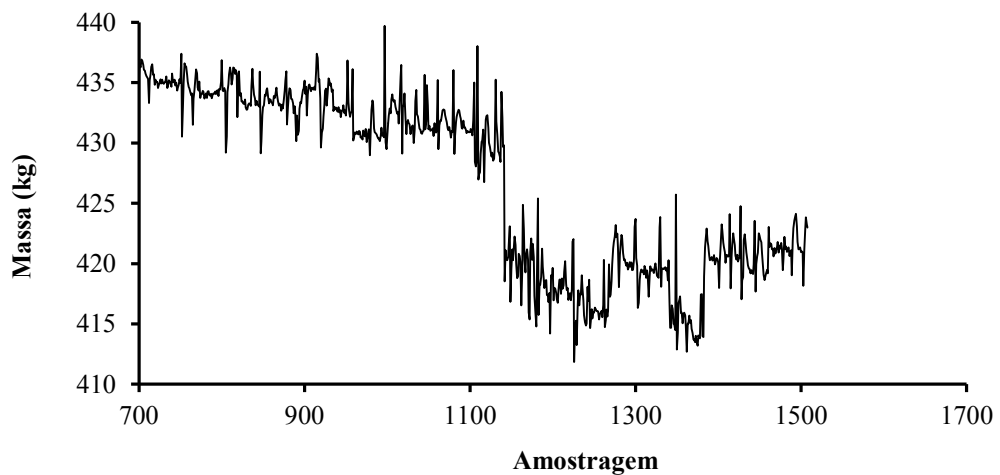


Figura 43 – Variação da massa ao longo do tempo durante o experimento na estufa.

Essa grande variação deixou clara a necessidade da repetição dos testes com uma nova célula de carga mais precisa ou na mudança da metodologia. Porém, mesmo assim, foi feita a correlação da umidade com a resposta do sensor para verificar a existência de um modelo matemático aproximado com base nos dados obtidos.

Na Figura 44 mostra-se a relação entre a umidade e a resposta fornecida pelo sensor, claramente um modelo matemático polinomial de 3ª ordem, o que confirma a sensibilidade do sensor à variação de umidade. Porém para este experimento o sensor só foi capaz de ler a umidade acima de 11%. O objetivo deste projeto de pesquisa é que o sensor seja capaz de ler entre 5% a 18%. Então essa metodologia foi descartada.

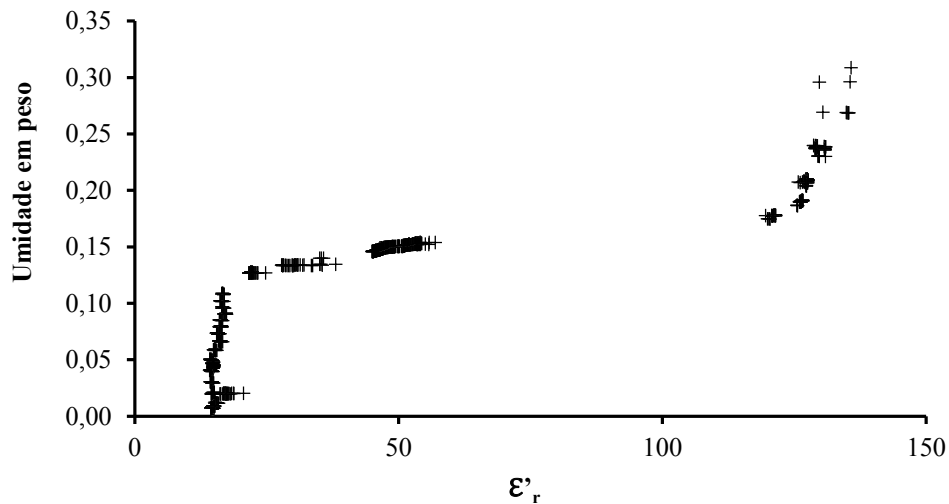


Figura 44 – Modelo de correlação no ensaio com a estufa.

Uma nova metodologia foi adotada. Ao invés de se usar o minério completamente úmido e secar continuamente na estufa com a aquisição de dados automática, foram criadas amostras com valores de umidade conhecidos.

6.5 Experimento II

6.5.1 Elaboração das amostras

As 9 amostras elaboradas para a calibração (4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18% e 20% de umidade) e as 5 amostras elaboradas para a validação (5%, 7%, 9%, 11% e 13% de umidade) foram preparadas e armazenadas em sacos plásticos para conservar a umidade internamente.

Na Figura 45 mostra-se a grande amostra de minério com teor de ferro e granulometria desconhecidos sendo seca na estufa, bem como algumas amostras com umidade conhecidas, preparadas após o processo de secagem e armazenadas em sacos plásticos.

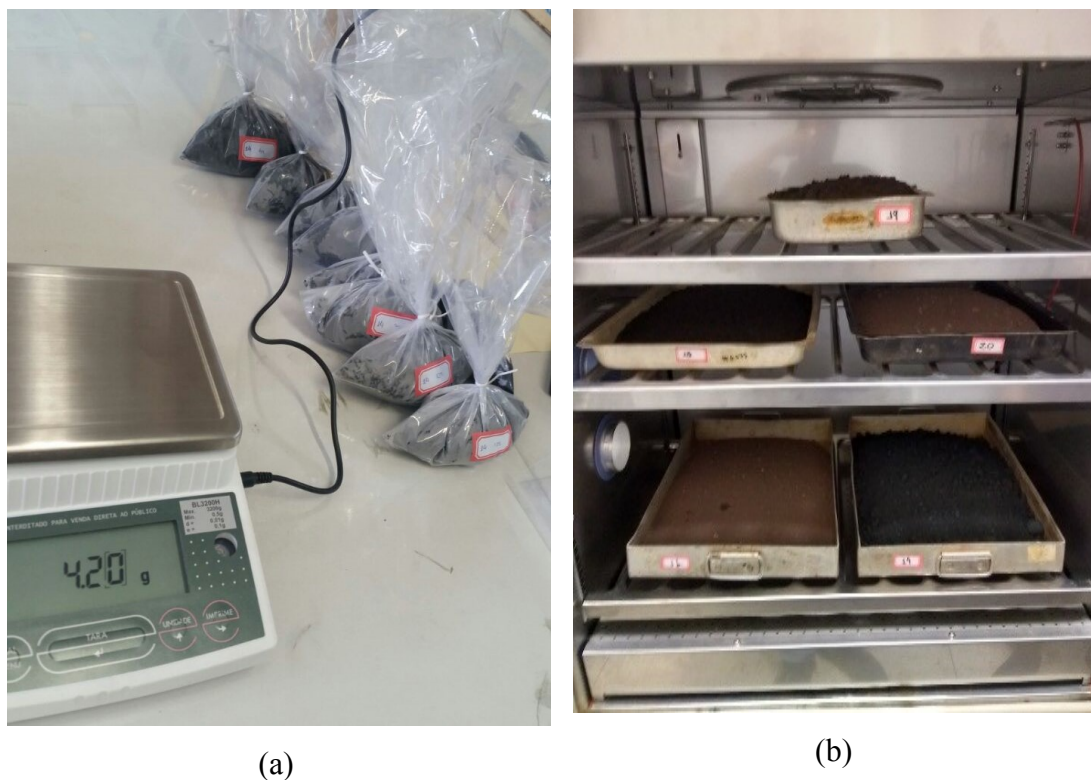


Figura 45 – Amostras preparadas com umidade conhecida (a) e amostras secando na estufa pelo método padrão antes do preparo (b).

6.5.2 Inserção das amostras no sensor

A correlação entre a constante dielétrica relativa medida pelo sensor e a umidade de cada amostra foi plotada em um gráfico e, então, foi realizada uma regressão para avaliar o modelo matemático que melhor representa os dados.

Na Figura 46 mostra-se que o modelo que mais se aproximou dos dados amostrados foi um polinômio de 3ª ordem.

Em comparação com o experimento I, o resultado foi extremamente melhor. Comparando-se a Figura 46 com a Figura 44, fica nítido que o segundo experimento não apresentou variações grosseiras como o primeiro, além de apresentar alto coeficiente de determinação (R^2), de mais de 99%. Além disso, ao contrário do primeiro experimento, o sensor respondeu de modo satisfatório para a faixa de umidade de interesse deste trabalho (5% a 18%).

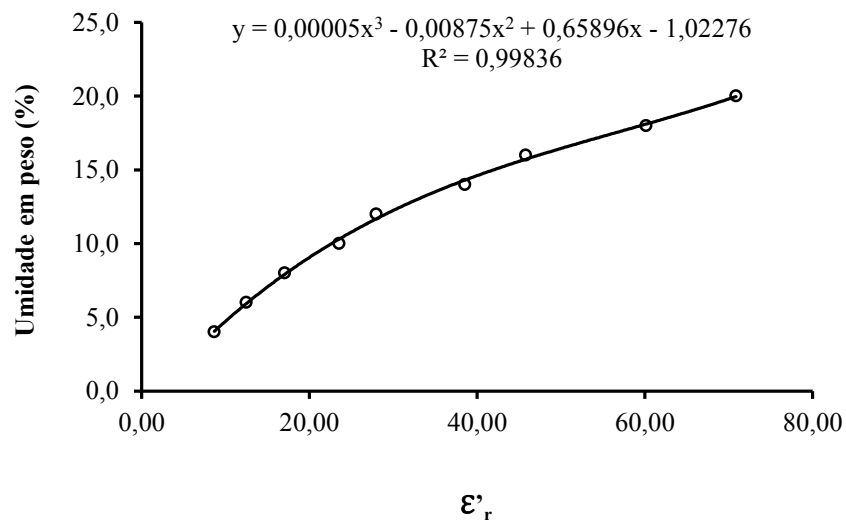


Figura 46 – Correlação entre a constante dielétrica relativa e a umidade do minério.

6.5.3 Validação do modelo

A fim de validar o modelo obtido para estimar a umidade do minério, as 5 novas amostras de minério com umidades de 5%, 7%, 9%, 11% e 13% foram inseridas no sensor, e o sistema foi utilizado para medir a umidade dessas amostras e, então, avaliar o erro do sensor.

Foi gerado o gráfico de erros, como é mostrado na Figura 47.

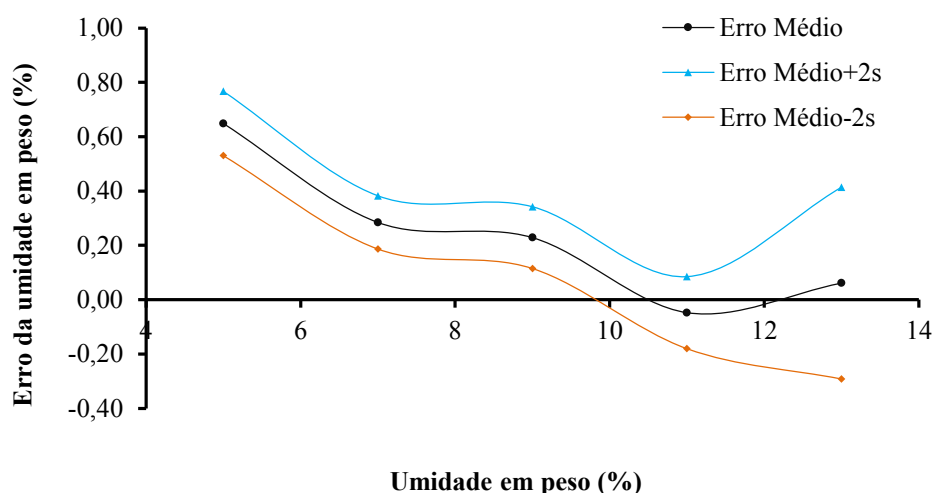


Figura 47 – Gráfico de erros do segundo experimento.

O resultado mostra um erro médio baixo e uma faixa de valores esperados também pequena. Foram utilizados 2 desvios padrões para mais ou para menos, de acordo com o que é indicado pela tabela *t-student* para 50 amostras, que foi a quantidade de leituras que o sensor realizou para cada amostra com umidade diferente.

O sistema apresentou um erro médio de apenas 0,06% para a amostra de 13% de umidade e um erro ainda menor para a amostra com maior umidade utilizada para a validação (valor já próximo do limite aceito pelo mercado para a comercialização do minério de ferro). Este resultado mostrou que o sensor quando calibrado para uma amostra de interesse, apresenta excelentes resultados. A desvantagem neste caso, é que o processo de calibração prévia demanda tempo e um técnico com o conhecimento para a elaboração de amostras com diferentes umidades. Vale ressaltar que o resultado encontrado neste experimento não leva em conta a influência do teor de ferro, a granulometria e a composição mineralógica do minério utilizado, já que o sensor foi previamente calibrado variando apenas a umidade.

6.6 Experimento III

6.6.1 Elaboração das amostras

Foram elaboradas 35 amostras para o processo de calibração, com 7 diferentes teores de ferro, e 5 diferentes umidades para cada. Ainda para cada umidade de cada amostra, foram realizadas 3 ou 4 diferentes níveis de compactação. A densidade aparente (ρ) foi levada em

consideração para os modelos. Assim como no experimento II, todas as amostras foram embaladas em sacos plásticos para manter a umidade.

6.6.2 Inserção das amostras no sensor

Todas as 35 amostras foram inseridas no sensor e a sua resposta foi avaliada para cada compactação de cada amostra. Todos os dados foram salvos em planilhas do Excel (Anexo I). Foram armazenados os seguintes dados nas planilhas para análise:

- peso das amostras secas (g);
- peso da água misturado à amostra (g);
- peso da amostra + água (g);
- umidade da amostra (%);
- teor de ferro (%);
- teor de sílica (%);
- compactações realizadas (mm);
- densidade aparente calculada (kg.m^{-3});
- 10 leituras em ganho, realizadas pelo sensor, para cada compactação, para 5,33 MHz de frequência, utilizadas para avaliar a constante dielétrica, variável de interesse deste trabalho;
- média dos 10 ganhos para cada compactação;
- média da média dos ganhos das compactações, para ter um ganho médio para cada umidade.

A primeira análise realizada entre as amostras foi uma inspeção simples nos resultados e, claramente, foi observado que os resultados para a amostra 14, que contém a maior concentração de ferro entre todas as amostras (67% de teor de ferro), não foram satisfatórias para o trabalho. A resposta do sensor saturou para todos os experimentos com essa amostra (a resposta em ganho do sensor foi sempre em torno de 3,8), logo, todas as 5 amostras elaboradas a partir da amostra 14 foram excluídas e não utilizadas para as análises posteriores. Esse fato da saturação ocorreu, provavelmente, devido ao alto teor de ferro da amostra, que em conjunto com a água, tornou a amostra muito condutiva, elevando muito o ganho do circuito e tornando impossível o processamento pelo microcontrolador, que utiliza um conversor A/D de 12 bits e entrada de 0 V a 5 V. O ganho saturou a saída do sensor para essa amostra. As demais amostras

foram consideradas boas para o prosseguimento com as análises, que são descritas nos tópicos a seguir. A retirada das 5 amostras elaboradas a partir da amostra 14 não prejudicou o prosseguimento das análises, visto que ainda restaram 6 das 7 amostras com diferentes teores de ferro, e um total de 30 amostras para a calibração (6 diferentes teores de ferro para cada um dos 5 umidades) e 24 amostras para a validação (4 diferentes umidades para cada um dos 6 teores de ferro).

6.6.3 Calibração do sensor

O modelo correlacionando a resposta do sensor em ganho e a constante dielétrica foi desenvolvido, e é mostrado na Figura 48. A resposta em ganho do sensor foi considerada no eixo das ordenadas, por ser a variável utilizada durante os cálculos do microcontrolador.

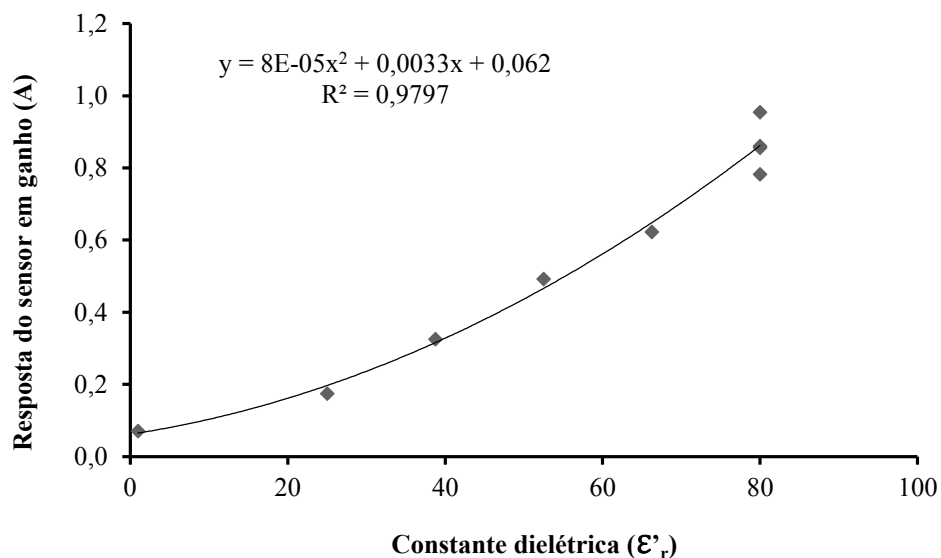


Figura 48 – Modelo correlacionando o a resposta do sensor em ganho e a constante dielétrica.

Foi, então, desenvolvido, empiricamente, o modelo matemático correlacionando a umidade com a resposta fornecida pelo sensor para o ganho médio entre as diferentes compactações realizadas em cada uma das 30 amostras.

Os resultados são mostrados a seguir para as amostras agrupadas pelo teor de ferro.

Na Figura 49 mostra-se o modelo matemático desenvolvido para o ganho médio fornecido pelo sensor para a amostra 6.

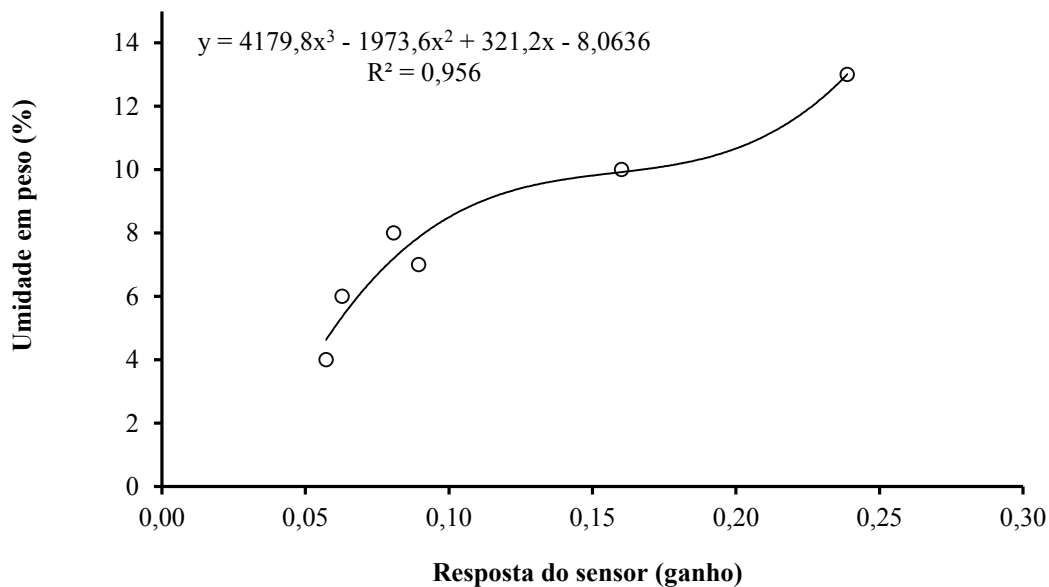


Figura 49 – Modelo matemático para o valor médio entre as compactações para a amostra 6.

Esse resultado foi exibido separadamente para enfatizar que para os modelos mostrados a seguir, o polinômio exibido no gráfico será sempre referente ao ganho médio entre as compactações.

A fim de analisar a influência da compactação na resposta do sensor, os gráficos dos modelos para cada compactação foram plotados juntamente com o gráfico dos valores médios. Os resultados são exibidos pelas Figuras 61-66.

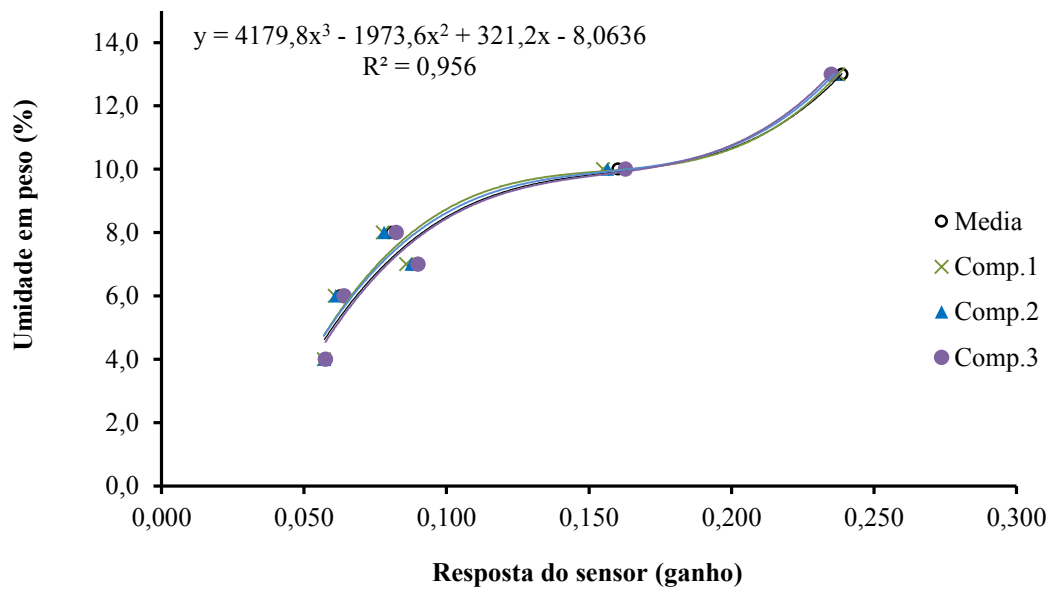


Figura 50 – Influência das diferentes compactações para na amostra 6.

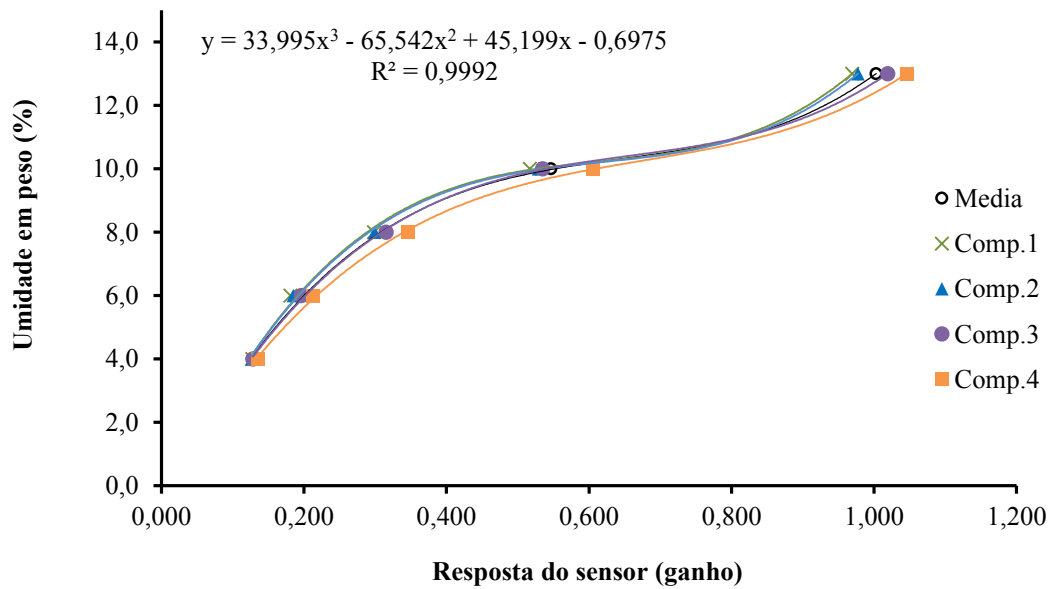


Figura 51 – Influência das diferentes compactações para na amostra 7.

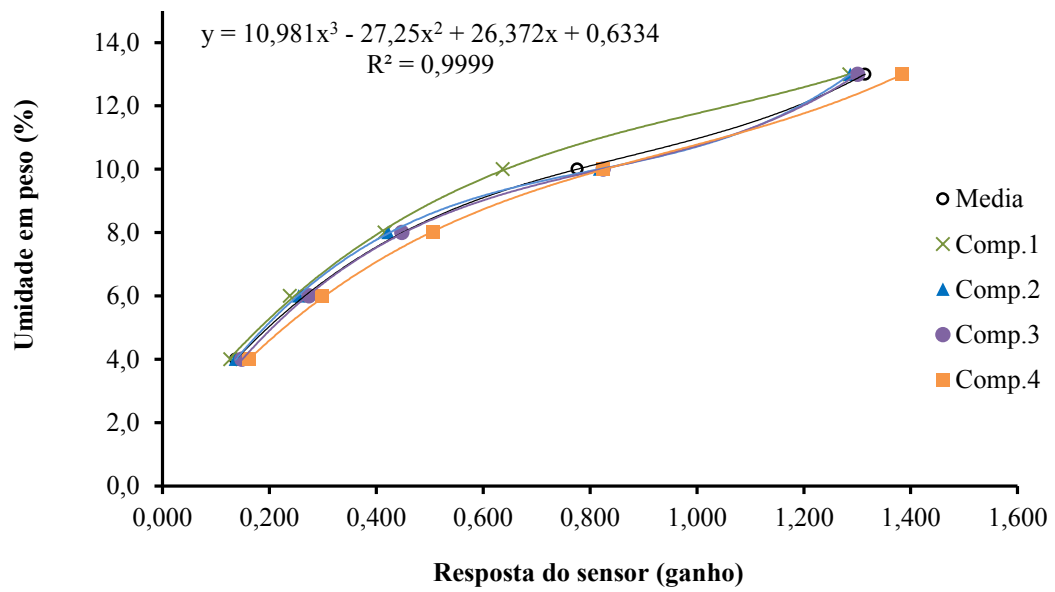


Figura 52 – Influência das diferentes compactações para na amostra 11.

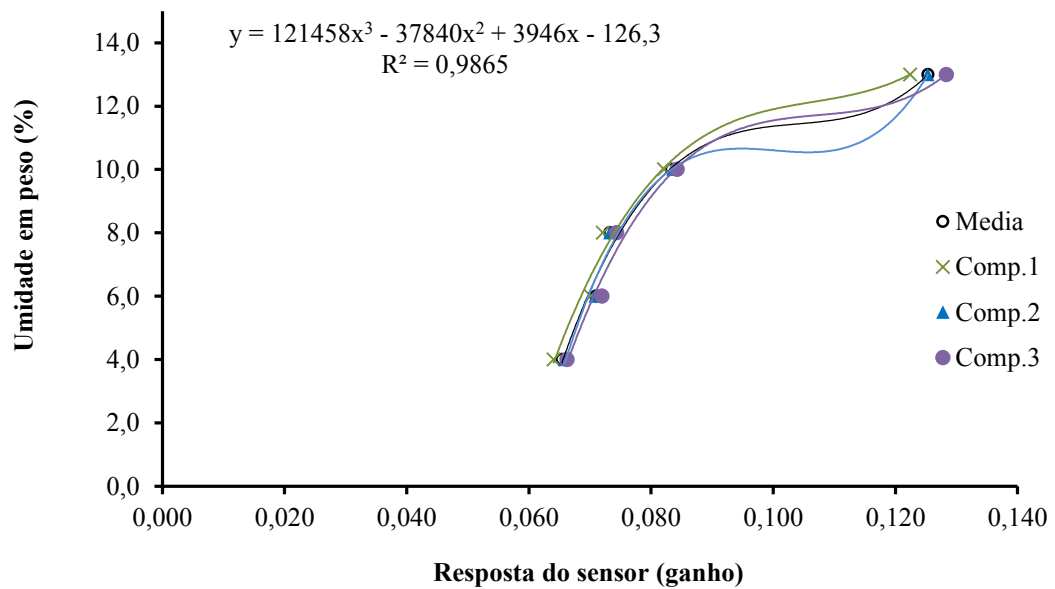


Figura 53 – Influência das diferentes compactações para na amostra 13.

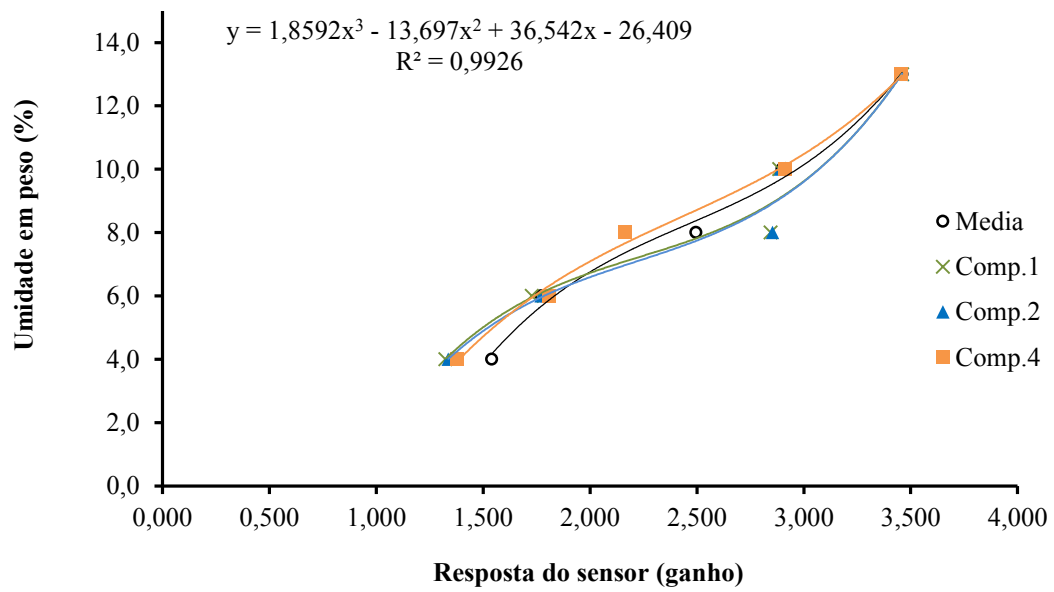


Figura 54 – Influência das diferentes compactações para na amostra 15.

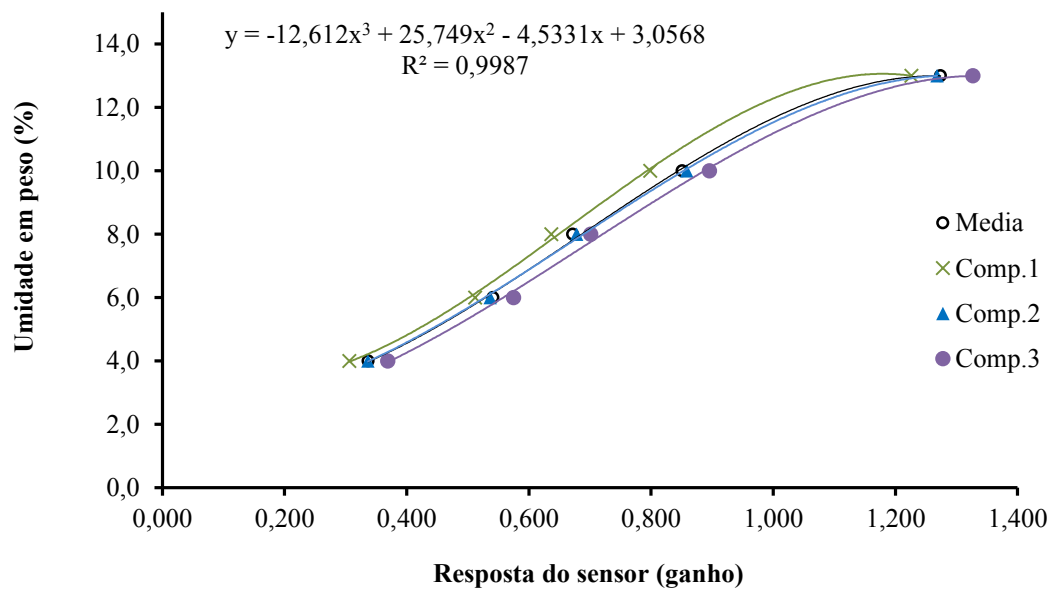


Figura 55 – Influência das diferentes compactações para na amostra 19.

Todos os modelos que correlacionam os valores médios das compactações de cada amostra com a resposta do sensor, em ganho, apresentam um polinômio de terceira ordem com um alto R^2 .

Considerando-se o modelo genérico $y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + K$, sendo y a resposta do sensor em ganho e x a umidade em peso em porcentagem (%), os modelos encontrados foram organizados na Tabela 5, juntamente com o R^2 e o teor de ferro para cada amostra.

Tabela 5 – Termos encontrados para cada amostra para um modelo de terceira ordem

	Fe (%)	A	B	C	K	R^2
Amostra 6	33,25	4179,8	- 1973,6	321,2	- 8,0636	0,956
Amostra 7	51,74	33,995	- 65,542	45,199	- 0,6975	0,9992
Amostra 11	45,51	8,4202	- 22,02	23,392	1,1747	1,0000
Amostra 13	8,03	121458	- 37840	3946	- 126,3	0,9865
Amostra 15	64,03	1,8592	- 13,697	36,542	- 26,409	0,9926
Amostra 19	50,22	-12,612	25,749	- 4,5331	3,0568	0,9987

6.6.4 Influência da densidade aparente

A influência da compactação foi mostrada anteriormente juntamente com os modelos correlacionando a umidade com a resposta do sensor. Porém, este tópico busca mostrar individualmente a influência da compactação, correlacionando-a indiretamente (por meio da densidade aparente) com a resposta do sensor, em ganho. Como a compactação é indiretamente proporcional à densidade aparente, esta última foi considerada para as análises. Para os gráficos mostrados a seguir, as amostras também foram agrupadas pelo teor de ferro e também o efeito da densidade aparente foi agrupado pelas diferentes umidades, a fim de tornar a análise mais detalhada e tornar os gráficos mais informativos.

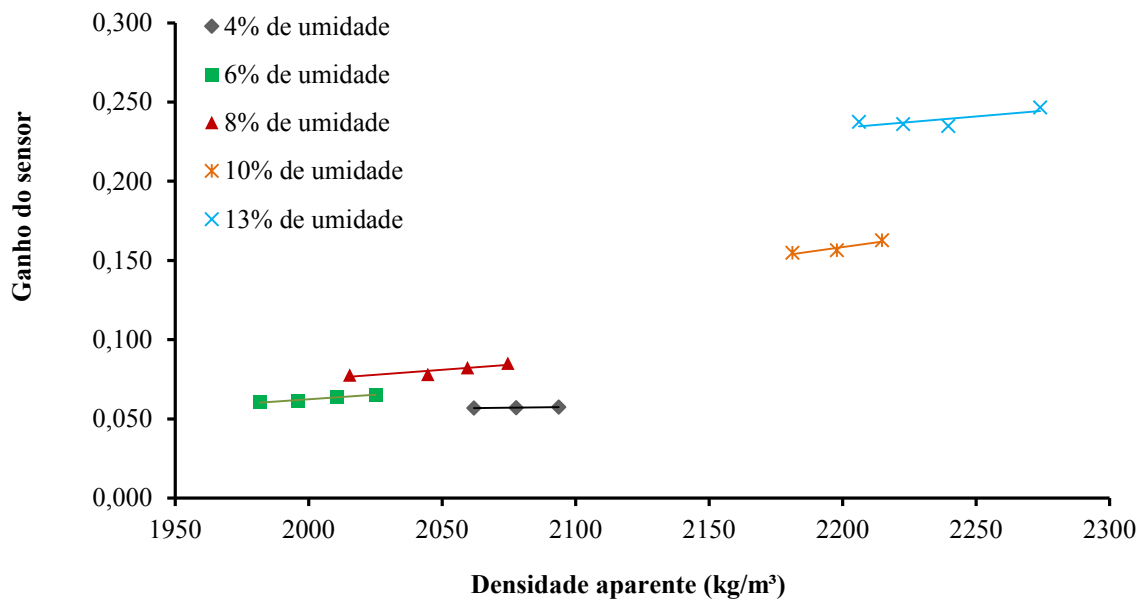


Figura 56 – Influência da densidade aparente na amostra 6.

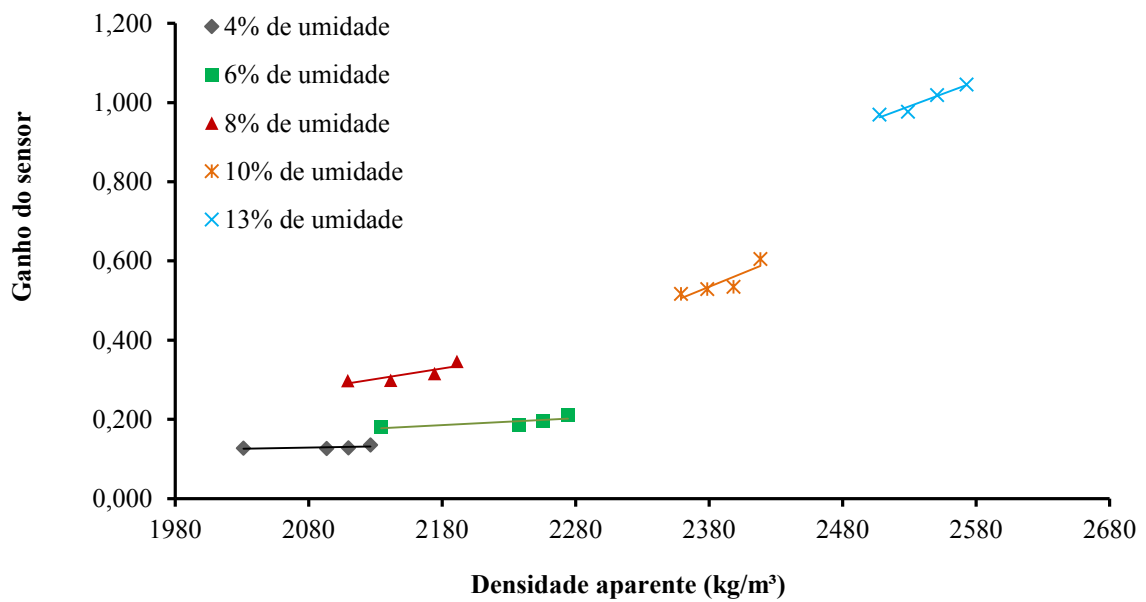


Figura 57 – Influência da densidade aparente na amostra 7.

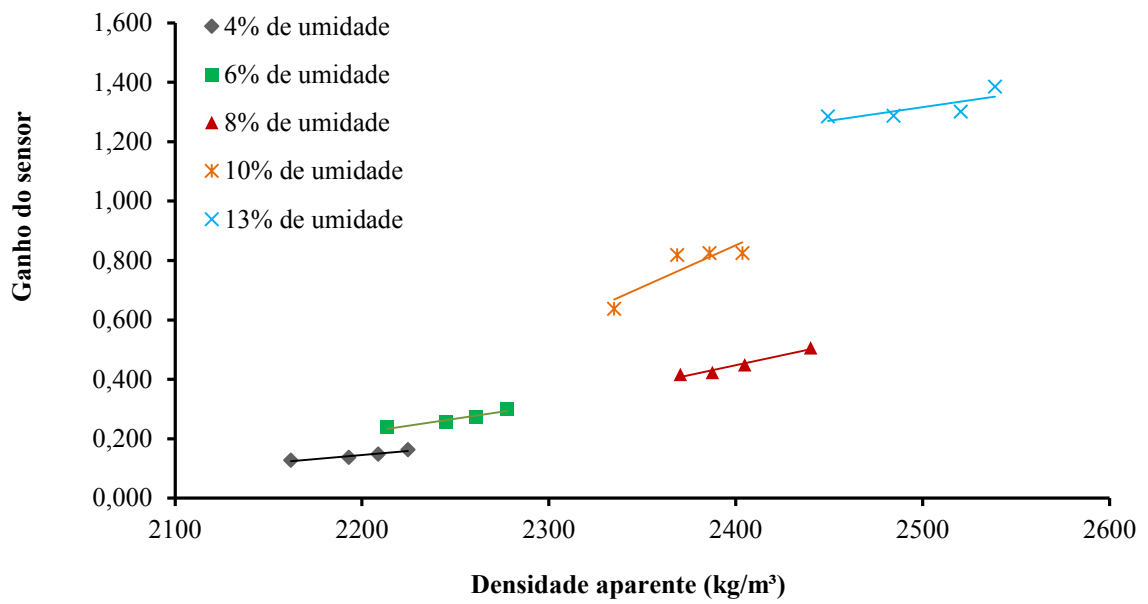


Figura 58 – Influência da densidade aparente na amostra 11.

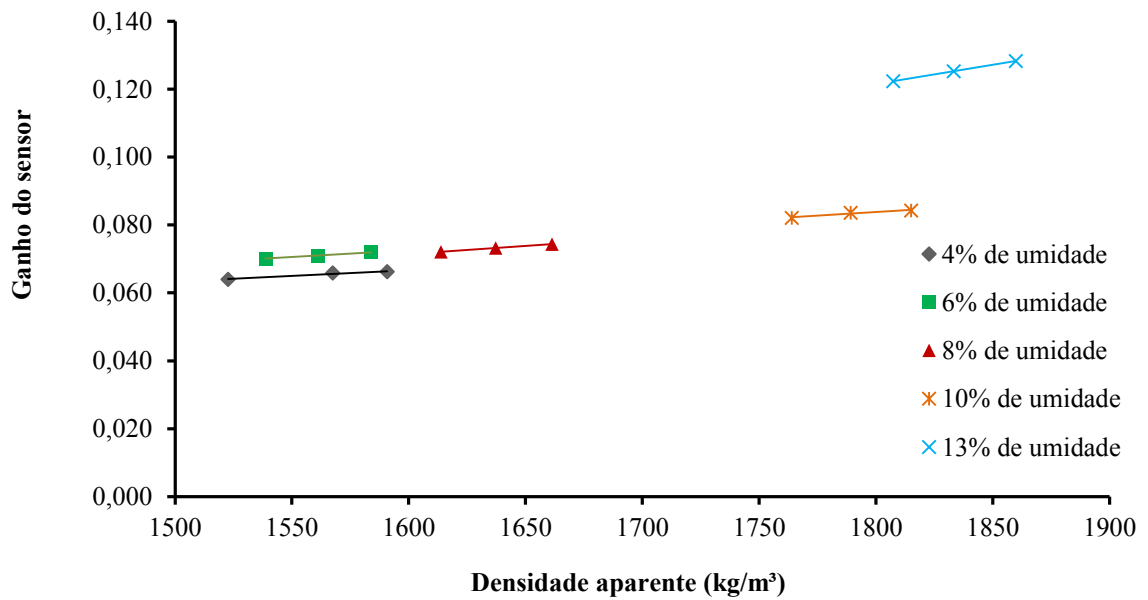


Figura 59 – Influência da densidade aparente na amostra 13.

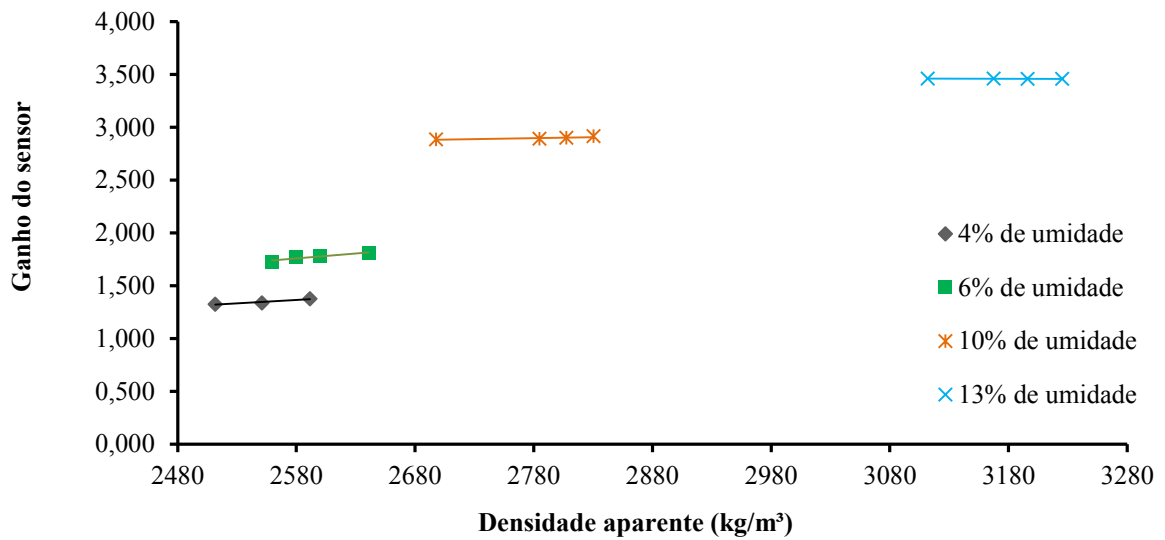


Figura 60 – Influência da densidade aparente na amostra 15.

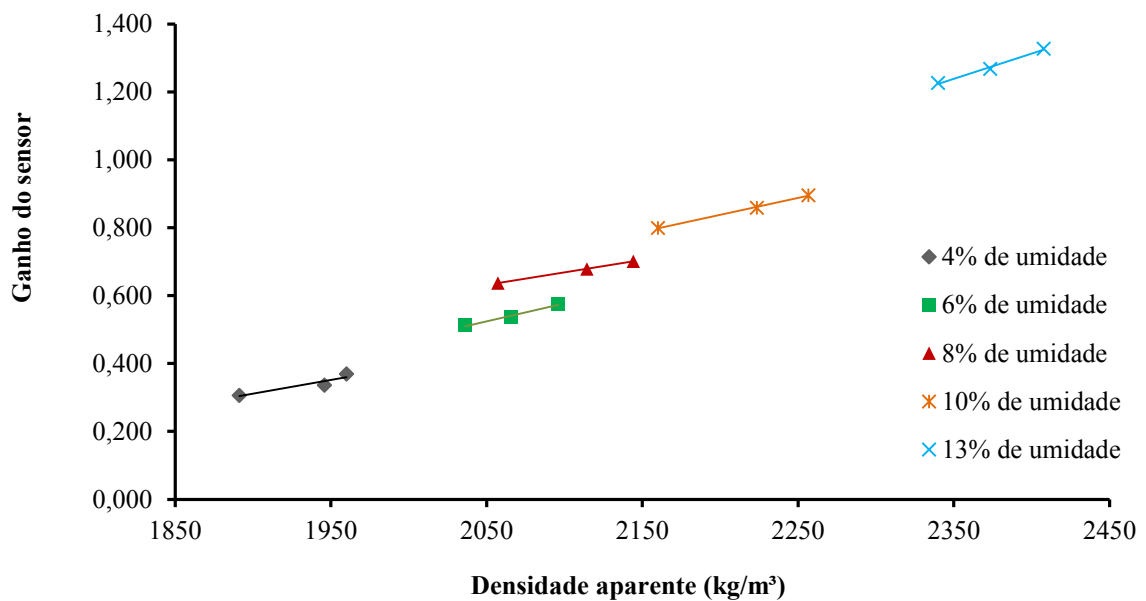


Figura 61 – Influência da densidade aparente na amostra 19.

Para algumas amostras foram realizadas 4 compactações diferentes, enquanto para outras foram realizadas apenas 3, devido à dificuldade de compactação para algumas, pois

compressões maiores poderiam danificar a estrutura do sensor (descolar as placas de acrílico por exemplo).

Observa-se que a densidade aparente pode ser explicada por meio de um modelo matemático de primeira ordem (relação linear) com a resposta do sensor em ganho e para um mesmo teor de ferro e umidade. Porém, como foram utilizados apenas 3 ou 4 pontos, para fazer essa afirmação com um nível maior de assertividade, seria necessário realizar o experimento com mais amostras com diferentes densidades aparentes e, assim, ter mais pontos para garantir uma confiabilidade maior na regressão matemática. Porém, para o prosseguimento deste trabalho, uma relação linear é uma boa aproximação para relacionar a densidade aparente e a resposta do sensor.

O gráfico empírico que relaciona a umidade, a densidade aparente e a resposta do sensor em ganho foi plotado com o auxílio do software Minitab e pode ser visualizado na Figura 62.

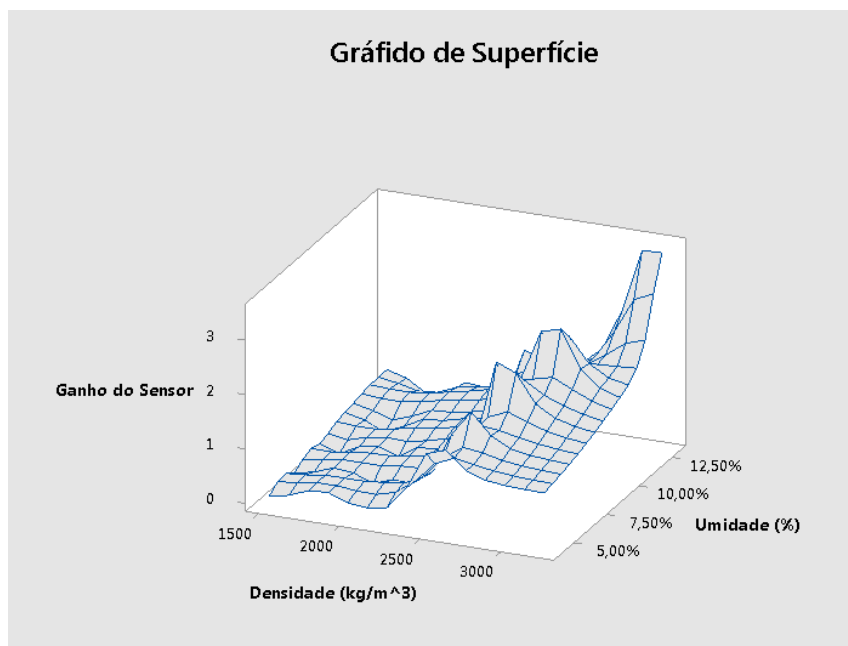


Figura 62 – Gráfico empírico relacionando a resposta do sensor em ganho com a umidade, e a densidade aparente de todas as mostras.

6.6.5 Influência do teor de ferro

Este tópico busca analisar a influência do teor de ferro na resposta do sensor.

Na Figura 63 mostra-se um modelo para cada uma das amostras agrupadas pelo teor de ferro. Para o desenvolvimento dos modelos, foram utilizados os dados da resposta média do sensor para cada umidade, ou seja, para cada umidade foi utilizada a resposta em ganho médio entre as diferentes respostas para as diferentes densidades aparentes ou compactações realizadas. Foram traçados, então, os gráficos da umidade pela resposta média do sensor em ganho.

Claramente, é visto que o teor de ferro exerce forte influência na resposta em ganho do sensor, a qual será quantificada posteriormente.

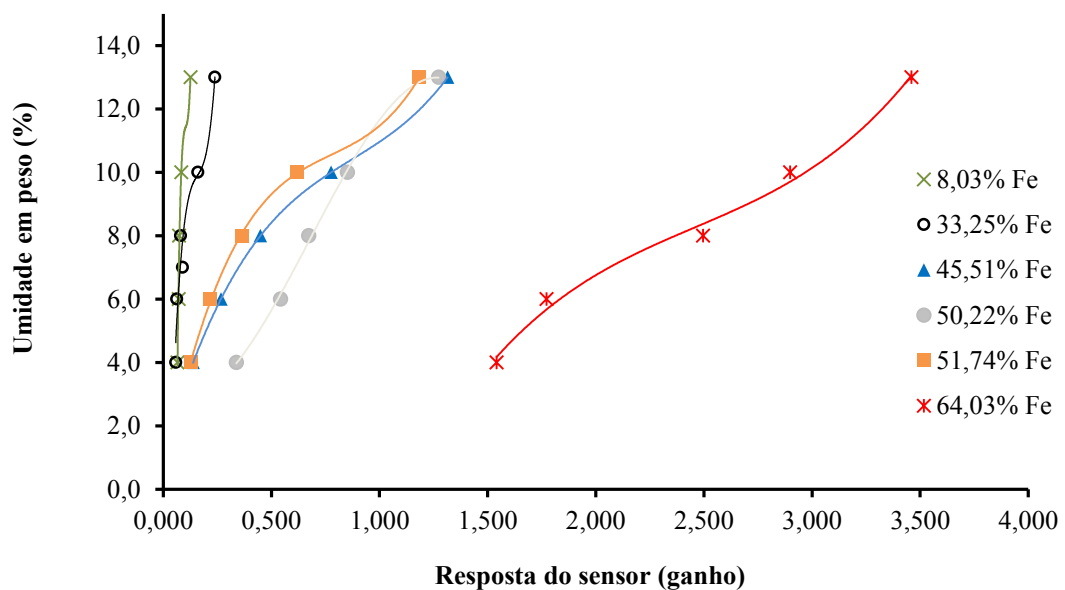


Figura 63 – Modelos do sensor para diferentes teores de ferro.

Todos os resultados das amostras podem ser representados por um polinômio de terceira ordem. Claramente para amostras com teores de ferro maiores, como é o caso da amostra com 64% de ferro, a resposta do sensor é mais alta.

Na Figura 64 mostra-se como a resposta do sensor é bem parecida para amostras com teores de ferro próximas.

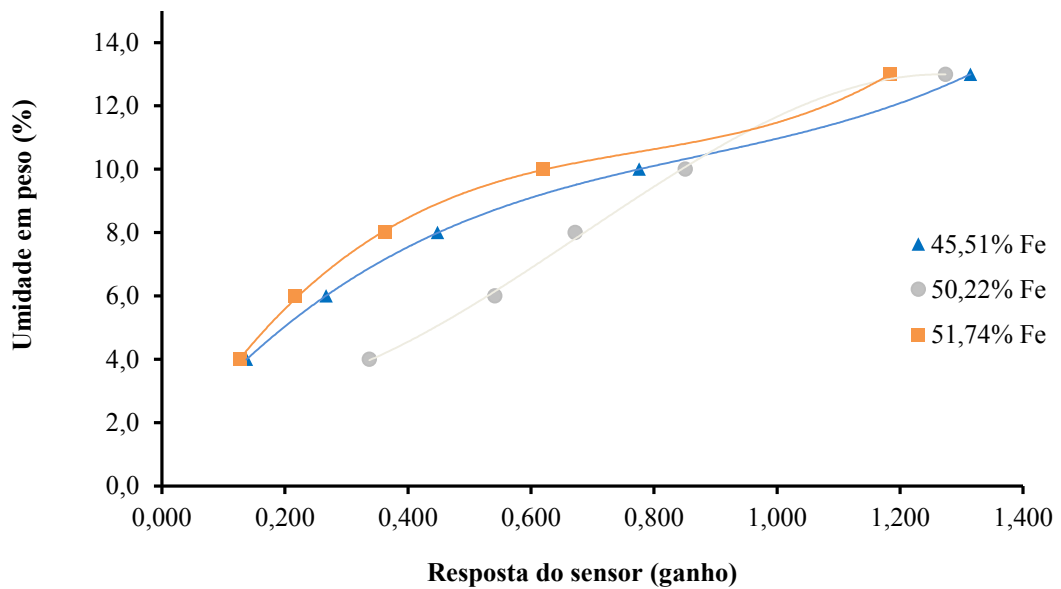


Figura 64 – Influência do teor de ferro para amostras com teores mais próximas.

A resposta da amostra com teor de ferro de 50,22% ficou um pouco diferente das amostras com teor de ferro próximas (45,51% e 50,22%) devido à densidade aparente média dessa amostra que se diferenciou das demais.

Como visto no tópico anterior, a densidade aparente também exerce uma forte influência na resposta em ganho do sensor. Já na Figura 65 mostra-se a diferença da resposta do sensor para amostras com teor de ferro bem distintos, sendo uma com 8,03% de ferro e a outra amostra com 33,25% de ferro. Porém ainda assim o modelo de terceira ordem ajusta-se a ambos os conjuntos de pontos.

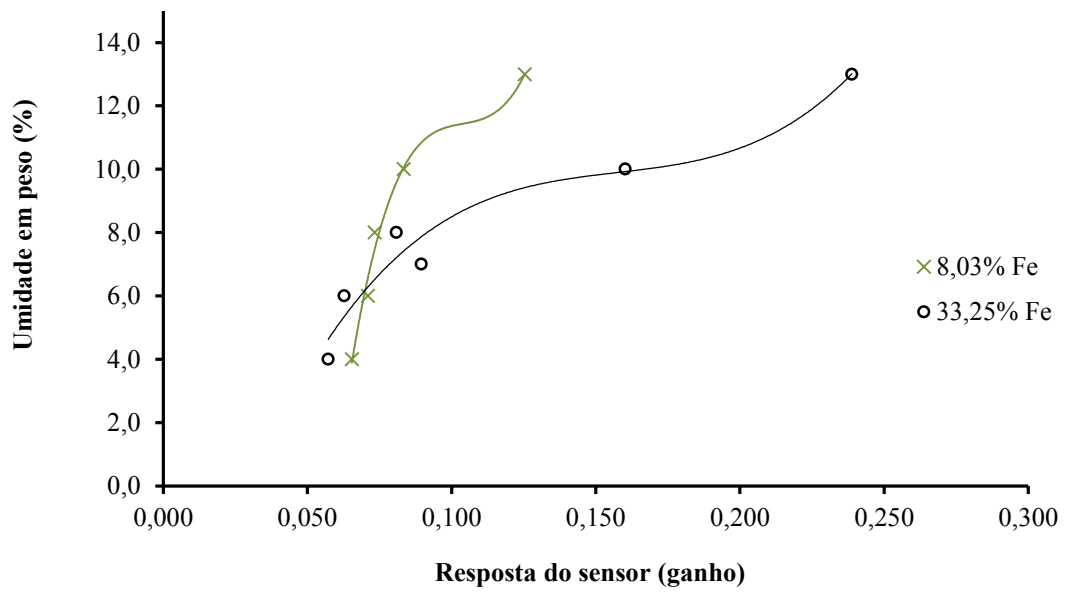


Figura 65 – Influência do teor de ferro nas amostras.

Para analisar a correlação entre o teor de ferro, a umidade e a resposta do sensor em conjunto, foi plotado mais uma vez um gráfico empírico de superfície. Na Figura 66 mostra-se o gráfico gerado.

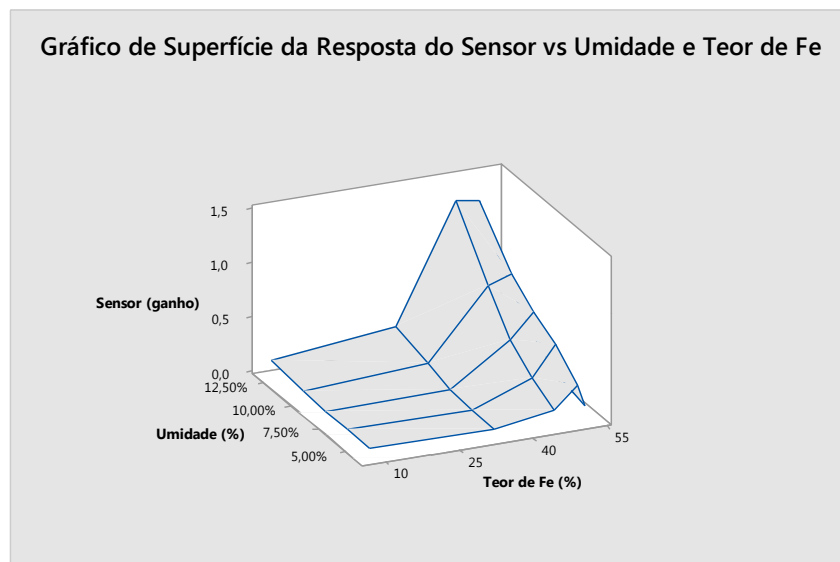


Figura 66 – Gráfico empírico de superfície relacionando a resposta em ganho do sensor com a umidade e o teor de ferro

A fim de analisar como a resposta do sensor é influenciada diretamente pelo teor de ferro, foi desenvolvido um modelo matemático que correlacione a resposta do sensor em ganho e o teor de ferro. Foi utilizada para análise como referência as amostras com umidade igual a 8%, e densidade aparente próxima de 2300 kg.m^{-3} . Como as densidades aparentes não foram perfeitamente padronizadas, foi escolhido o ganho fornecido pelo sensor para as densidades aparentes o mais próximo possível de 2300 kg.m^{-3} de cada amostra. A Figura 79 mostra o gráfico gerado.

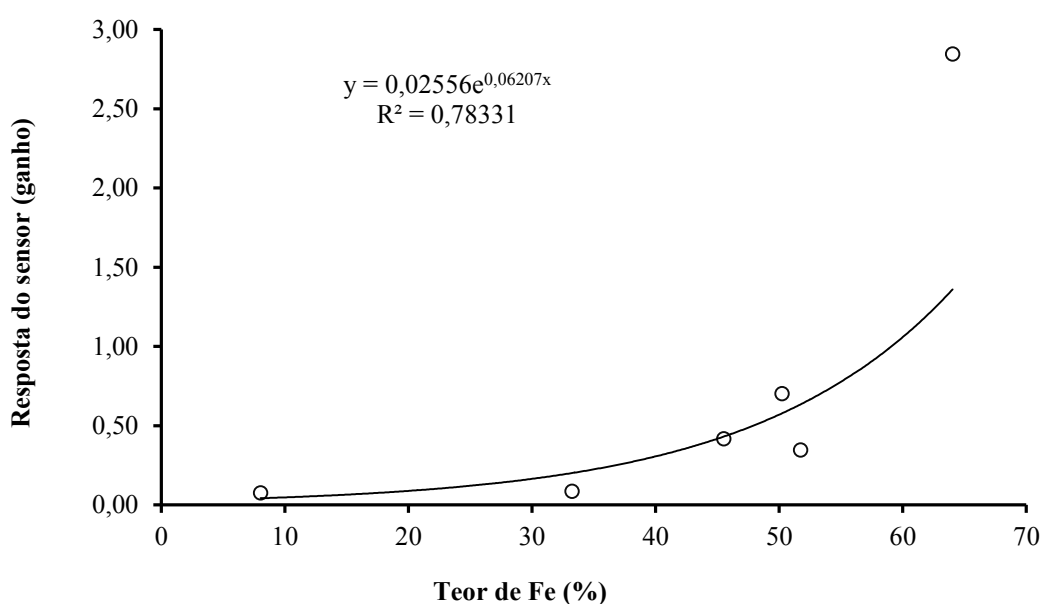


Figura 67 – Modelo relacionando a resposta do sensor com o teor de ferro.

Este gráfico mostrou um resultado interessante. Houve uma grande diferença entre os ganhos fornecidos pelo sensor das amostras 7 e 19, ambas com teor de ferro bem próximas: 51,74% e 50,22%, respectivamente, e densidades aparentes também semelhantes: $2191,19 \text{ kg.m}^{-3}$ e $2144,25 \text{ kg.m}^{-3}$. O ganho fornecido pelo sensor para a amostra 7 foi de 0,35 e para a amostra 19 foi de 0,70, ou seja, duas vezes maior. Porém, ao analisar a granulometria de ambas as amostras, o resultado foi compreendido, pois a amostra 19 possui granulometria bem menor que a amostra 7. Esse dado foi mostrado na Tabela 4, onde a amostra 7 apresenta granulometria média de $836,39 \mu\text{m}$ e a amostra 19 apenas $52,83 \mu\text{m}$. Na prática significa que existe menos

espaço entre as partículas na amostra 7 do que na 19, e quando as amostras são inseridas no sensor, a quantidade de ar existente entre as placas para ambas as amostras se diferencia muito.

Quanto maior a granulometria mais ar entre as placas e menor é a constante dielétrica, logo, a resposta do sensor também é menor. Isso foi observado claramente pelo gráfico, onde a resposta para a amostra 7 (menor granulometria) foi duas vezes menor que o ganho fornecido da amostra 19.

O modelo mostra que a resposta do sensor cresce exponencialmente de acordo com o teor de ferro, ou seja, o sensor tende a saturar rapidamente quando o teor cresce. Isso justifica quando a amostra 14, com 67% de teor de ferro foi retirada das análises visto que o sensor foi saturado quando inserido no sensor. Para este trabalho, o sistema de medição pode apresentar uma mensagem informando que o teor de ferro é muito alto, quando o teor de ferro for maior que 65%, por exemplo, e que não é possível fornecer um resultado para a amostra em questão.

6.6.6 Modelo geral desenvolvido

A influência da umidade, do teor de ferro e da densidade aparente foram possíveis de serem estudadas e analisadas, já que as amostras possuíam diferentes valores para essas variáveis, de forma que se manteve fixo o valor de alguma delas e estudou-se a variação da resposta do sensor somente quando outra varia, por exemplo, mantendo o teor de ferro e a densidade aparente aproximadamente fixa, e analisando as diferentes respostas em ganho do sensor para a umidade, e assim sucessivamente para as outras variáveis. Porém, isso não foi possível em se tratando da granulometria, pois ela teve um valor diferente para cada amostra, não tendo sido possível analisar a resposta do sensor somente analisando a variação da granulometria. Logo, foi gerado um modelo geral para o sistema, já em umidade, em função da resposta do sensor em ganho, do teor de ferro em porcentagem e da densidade aparente em kg.m^{-3} . Para modelar o sistema empiricamente, levando em consideração as variáveis que influenciaram a resposta do sensor, foi realizada uma regressão multivariável com auxílio do software Minitab, e foi encontrado o seguinte modelo, apresentando R^2 igual a 90,15%:

$$u = -32,35 + 0,0771 Fe + 27,81 A + 0,02477 \rho + 0,00422 Fe^2 + 1,330 A^2 - 0,4916 Fe \cdot A - 0,000279 Fe \cdot \rho , \quad (40)$$

em que u é a umidade em peso (%); Fe é o teor de ferro (%); A é a resposta do sensor em ganho; ρ é a densidade aparente do minério de ferro ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

O modelo mostra claramente que todas as três variáveis exercem forte influência na resposta do sensor, como era esperado de acordo com os tópicos anteriores.

A constante dielétrica poderia ter sido considerada no modelo em vez do ganho A , porém, para a implementação do sistema, a variável de importância é o ganho, que a medida direta realizada pelo microcontrolador. Manter o ganho A no modelo foi uma decisão do projeto. A correlação entre o ganho A do sensor e a constante dielétrica foi mostrada anteriormente.

Mais uma vez, vale ressaltar que para este modelo não foi considerada a granulometria, pois não havia amostras suficientes para descrever a sua influência sobre a resposta do sistema.

A Figura 68 mostra como a resposta do sensor é influenciada pelo teor de ferro, pela umidade e pela densidade aparente.

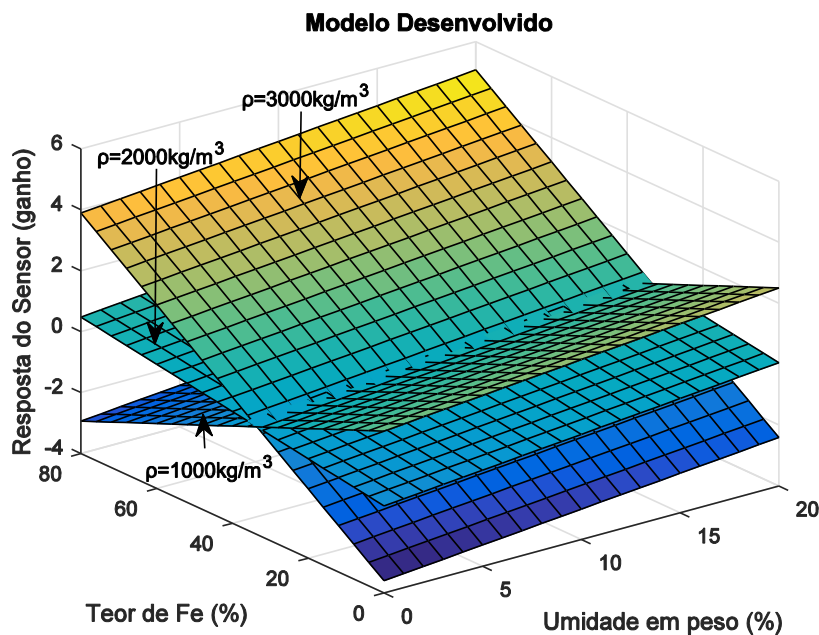


Figura 68 – Resposta do sensor em função do teor de ferro, da densidade aparente e da umidade.

Na Figura 69, foram plotados três gráficos distintos, variando a umidade entre 0% e 20%, o teor de ferro de 0% a 80% e três diferentes densidades aparentes, 1000 kg.m⁻³, 2000 kg.m⁻³ e 3000 kg.m⁻³, para o gráfico da resposta do sensor e 100 kg.m⁻³, 1500kg.m⁻³ e 3500 kg.m⁻³ para o gráfico da umidade.

Como o interesse deste trabalho é que o sensor forneça o valor da umidade, a Figura 69 foi plotada mostrando a umidade em função do teor de ferro, da resposta do sensor em ganho e da densidade aparente.

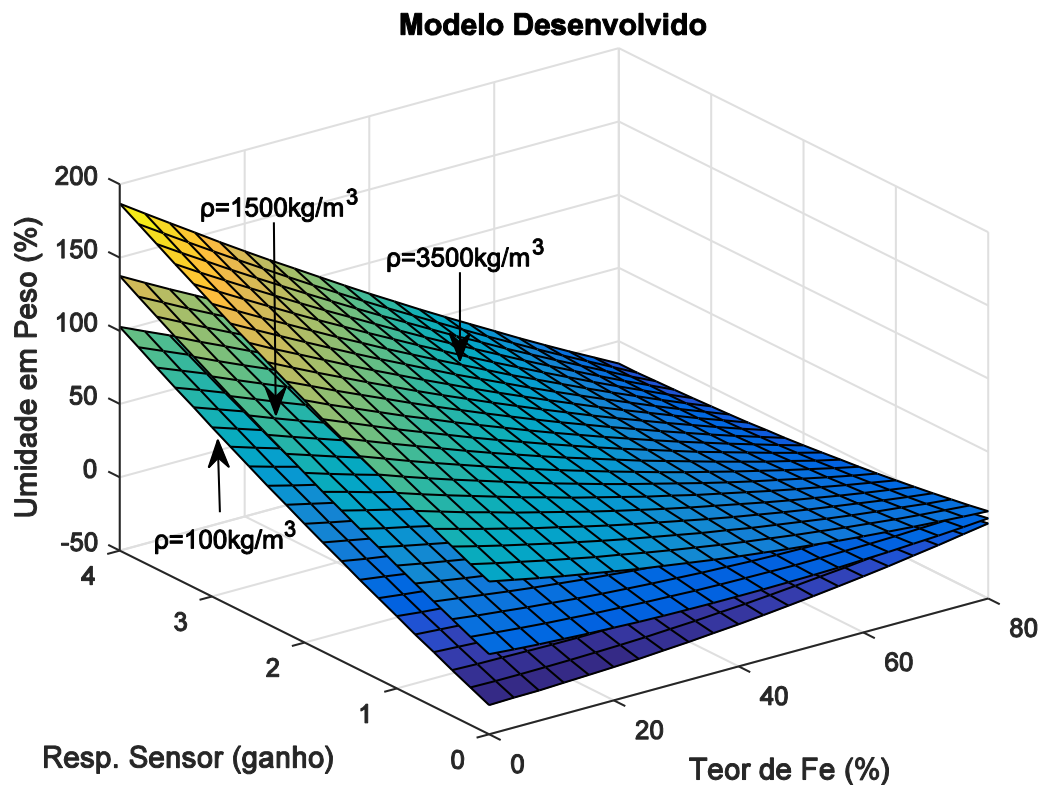


Figura 69 – Umidade em função da resposta do sensor em ganho, do teor de ferro e da densidade aparente.

O modelo se mostra eficiente na faixa de interesse deste trabalho, em que o teor de ferro está acima de 30% e umidade entre 4% e 18% aproximadamente. A próxima etapa foi validar o modelo para diferentes amostras (não utilizadas no processo de calibração) e analisar o erro existente.

Foi desenvolvido também o modelo levando em conta a granulometria. Esse modelo foi gerado apenas com o intuito de comparar o resultado dos erros com o modelo anterior, visto que o experimento não foi bem delimitado para a modelagem utilizando essa variável.

O modelo encontrado com o auxílio do software Minitab por meio de uma regressão multivariável, e com R² igual a 93,32%, foi:

$$\begin{aligned}
 u = & -28,01 + 0,3395 Fe + 12,24 A + 0,02534 \rho - 0,05492 G_r \\
 & - 0,001411 Fe^2 - 0,1485 Fe \cdot A - 0,000326 Fe \cdot \rho \\
 & + 0,001088 X1 \cdot G_r ,
 \end{aligned} \tag{41}$$

em que G_r é a granulometria em $kg.m^{-3}$.

Outro modelo desenvolvido isolando o teor de ferro como variável de interesse, apenas com o objetivo de analisar futuras aplicações do sensor para medir o teor de ferro. A equação 42 mostra o modelo encontrado com R² igual a 95,56%.

$$\begin{aligned}
 Fe = & -273,8 - 3,128u + 6,32A + 0,2791\rho - 3,865A^2 - 0,000057\rho^2 \\
 & + 1,532 u \cdot A .
 \end{aligned} \tag{42}$$

6.6.7 Validação dos modelos

Inicialmente, foi realizada a validação individual para cada um dos modelos encontrados para cada amostra (polinômios de terceira ordem) e, posteriormente, foi validado o modelo geral.

Para verificar a repetibilidade do sensor, foi calculado o desvio padrão para cada medida fornecida pelo sensor. Na Tabela 6 mostra-se o maior desvio padrão entre os desvios calculados para cada compactação, fornecido para cada amostra.

Tabela 6 – Maiores desvios padrões encontrados por amostra

Amostra	Maior desvio padrão fornecido (ganho)
6	0,0024
7	0,0080
11	0,009
13	0,0010
15	0,011
19	0,0078

Para gerar o gráfico de erros do modelo geral, primeiramente foram calculados os erros fornecidos para cada umidade de cada amostra. O erro é calculado pela diferença entre a umidade esperada e a fornecida pelo modelo. Logo após foi calculada a média dos erros e o desvio padrão, para cada umidade. Os desvios calculados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Desvios padrões dos erros para cada umidade na validação

Umidade (%)	Desvio padrão dos erros (%)
5	1,06
7	1,41
9	1,36
11	0,92

6.6.7.1 Validação dos modelos individuais das amostras

Os gráficos dos erros individuais de cada amostra são mostrados pelas Figura 70 até a Figura 75, e variaram de 0% a 2%. Somente a amostra 13 (8% de teor de ferro) apresentou erros maiores. Esse resultado será discutido após a apresentação do gráfico dessa amostra.

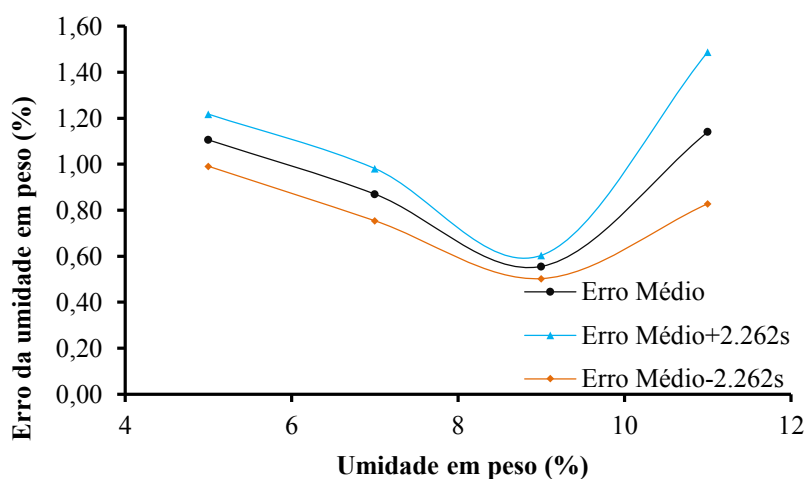


Figura 70 – Gráfico de erro para a amostra 6.

No gráfico de erro da amostra 6 mostra-se que houve um erro máximo de 1,6% e mínimo de 0,6%, aproximadamente.

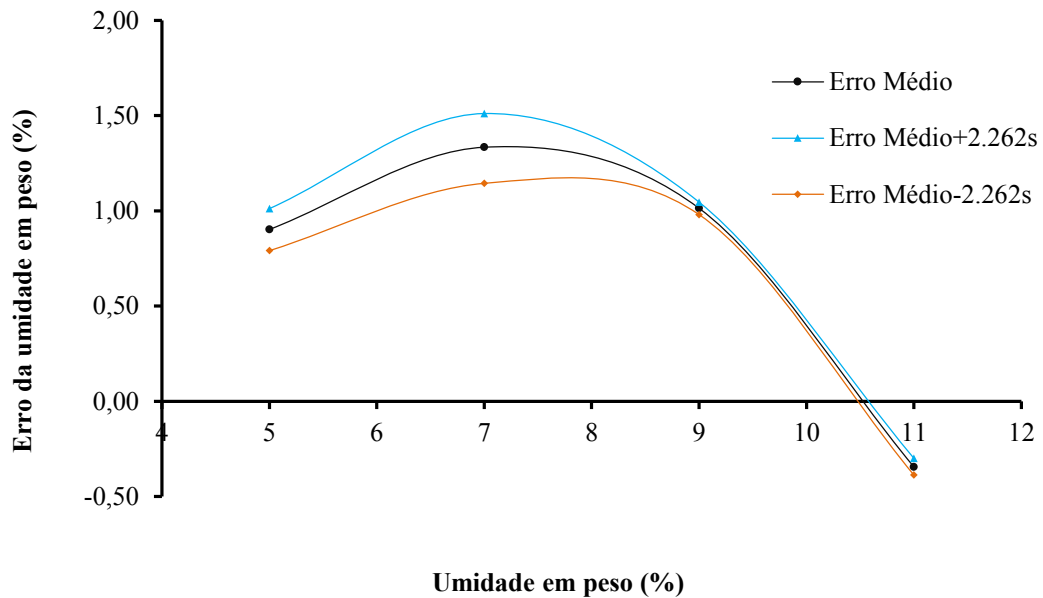


Figura 71 – Gráfico de erro para a amostra 7.

No gráfico de erro da amostra 7 mostra-se uma alta repetibilidade para umidade acima de 9% e erro menor que 1% para essa faixa, ou seja, dentro da faixa de interesse deste trabalho.

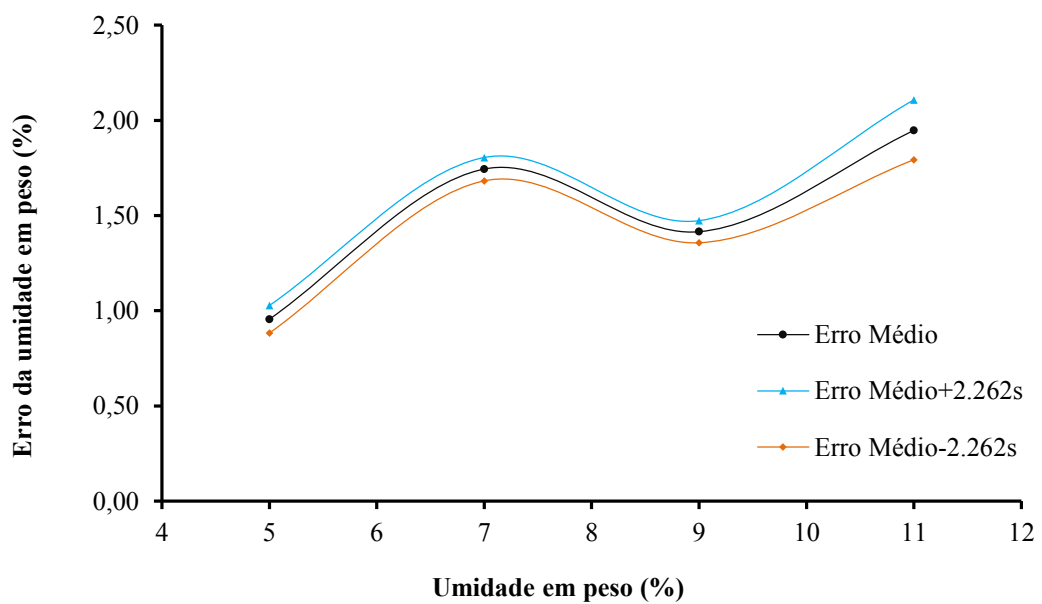


Figura 72 – Gráfico de erro para a amostra 11.

A amostra 11 apresentou um erro um pouco maior, entre 1% e 2%, porém para essa amostra em específico, uma análise mais aprofundada foi realizada no próximo tópico, durante a validação do modelo geral.

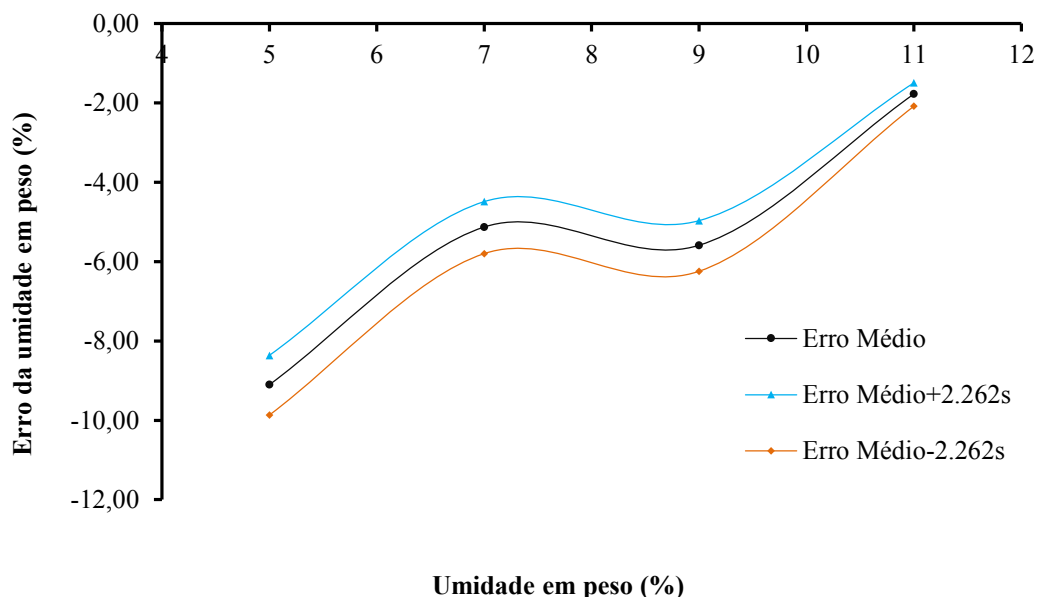


Figura 73 – Gráfico de erro para a amostra 13.

A amostra 13 apresentou erros grandes. Isso ocorreu devido ao modelo gerado decrescer rapidamente para umidades menores que 10% (Figura 53).

Para o processo de validação, foi utilizada a amostra de 8% de teor de ferro com densidade aparente maior do que no processo de calibração para todas as compactações (no processo de calibração foi utilizado 600 g da amostra, enquanto que no processo de validação foi utilizado 500 g), o que fez com que os valores fornecidos pelo sensor gerassem um erro muito grande de acordo com o modelo individual gerado para essa amostra.

Como a densidade aparente não foi considerada para os modelos individuais, então, essa diferença de densidade aparente entre as amostras de calibração e validação geraram esse erro maior.

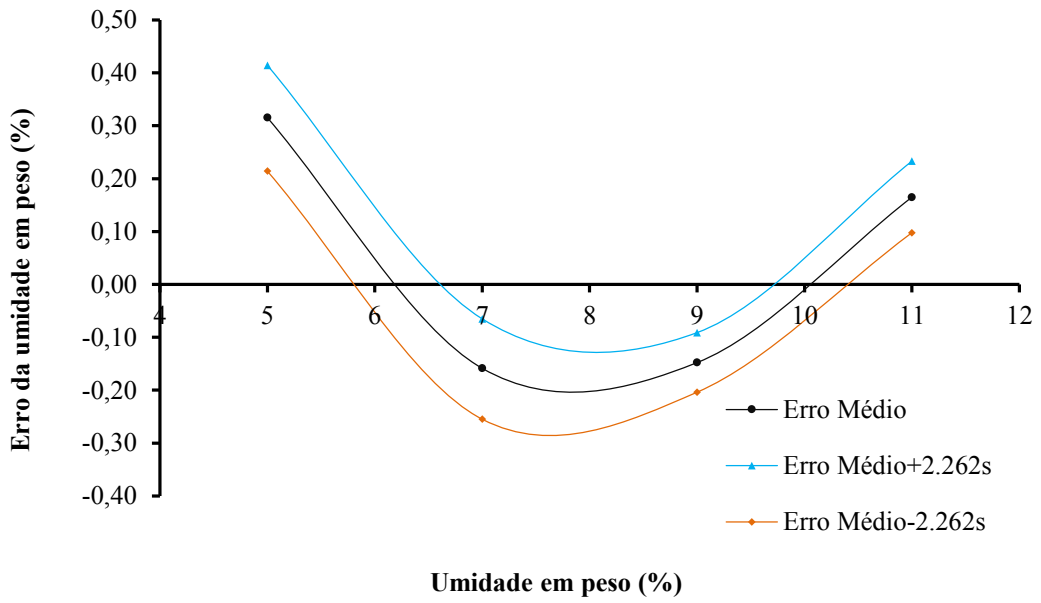


Figura 74 – Gráfico de erro para a amostra 15.

O erro para a amostra 15 foram os menores, ficando entre -0,3% e 0,4%.

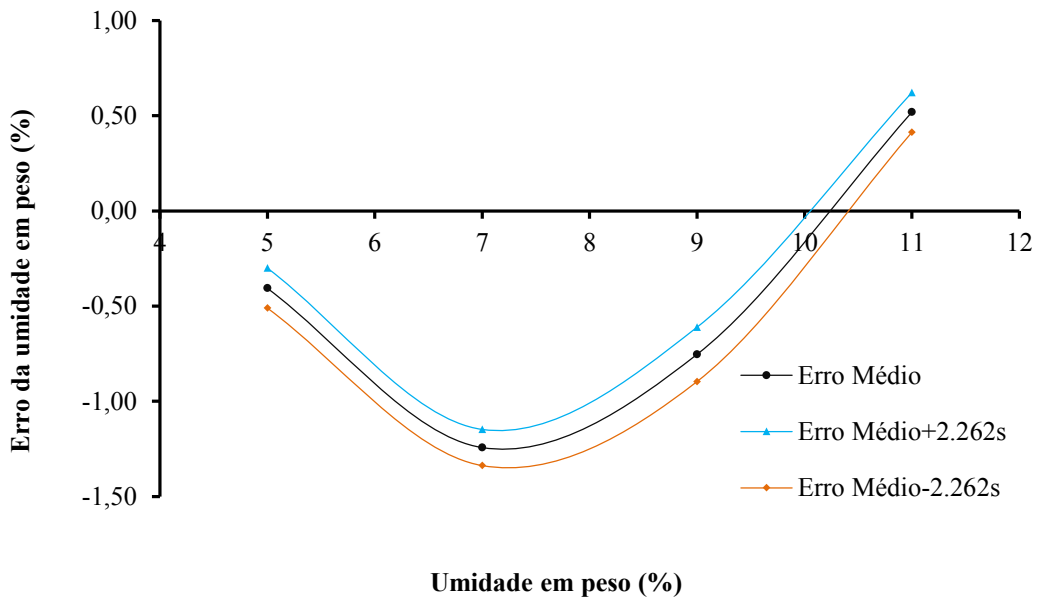


Figura 75 – Gráfico de erro para a amostra 19.

Os erros médios para a amostra 19 também ficaram entre, aproximadamente, -1% e 0,5%.

Como a maior umidade utilizada nas amostras foi de 13%, não foi possível analisar se o erro após este valor cresceria ou diminuiria. Mas para a faixa de interesse deste trabalho, que é entre 4% e 13%, ou melhor ainda, entre 8% e 12% (valores mais comuns na prática), os resultados se mostraram suficientes. Em seguida, foi avaliado o modelo geral, que leva em consideração o efeito de todas as variáveis em conjunto.

6.6.7.2 Validação do modelo geral

Após a validação dos modelos individuais, foi realizada a validação do modelo geral, em que se calcula a umidade em função do teor de ferro, da densidade aparente e da resposta do sensor.

Para este caso não é necessária uma calibração prévia do sensor para a amostra utilizada. Basta possuir as informações dessas variáveis da amostra, e o sensor é capaz de fornecer o valor da umidade.

O processo de validação foi similar ao das amostras individuais, porém para o modelo geral, os erros variaram de 0% a 3%. Apesar da granulometria não ter sido bem analisada, devido à falta de amostras, como mencionado anteriormente, foi decidido gerar os gráficos dos erros também considerando-a, com intuito de analisar a diferença quando considerada ou não.

Na Figura 76 à Figura 80 mostram-se os gráficos de erros para o modelo geral desenvolvido considerando ou não a granulometria, individualmente para cada amostra.

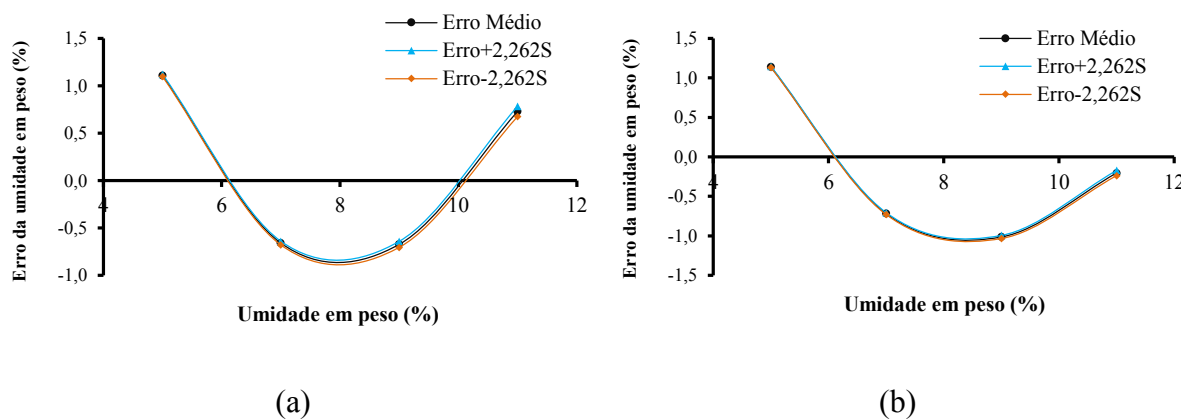
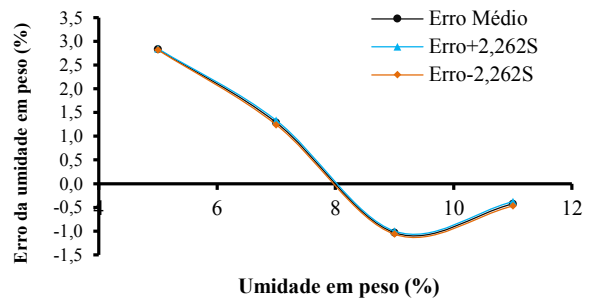
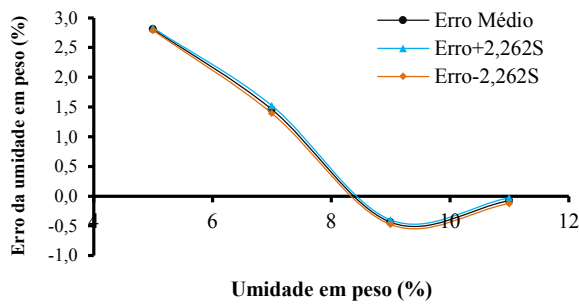


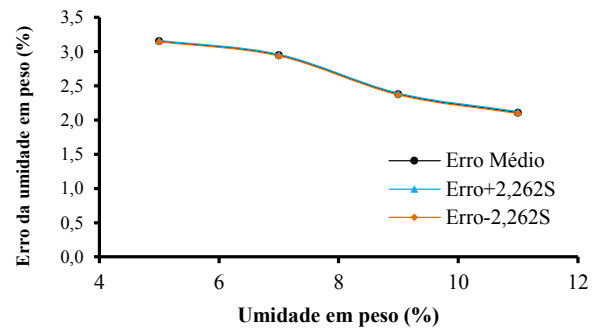
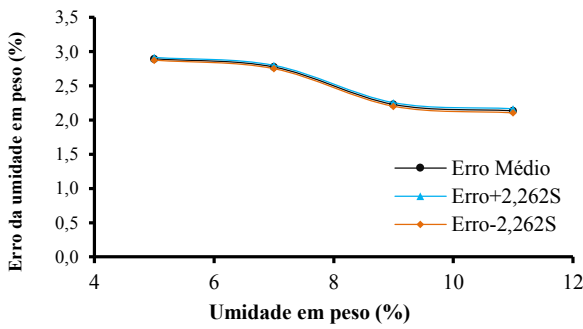
Figura 76 – Gráficos dos erros para a amostra 6 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).



(a)

(b)

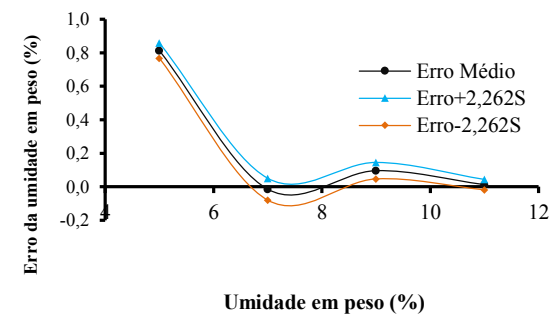
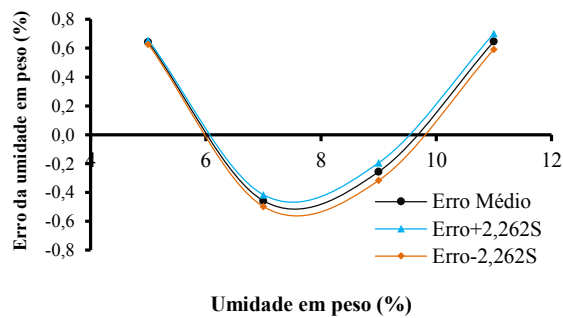
Figura 77 – Gráficos dos erros para a amostra 7 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).



(a)

(b)

Figura 78 – Gráficos dos erros para a amostra 13 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).



(a)

(b)

Figura 79 – Gráficos dos erros para a amostra 15 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).

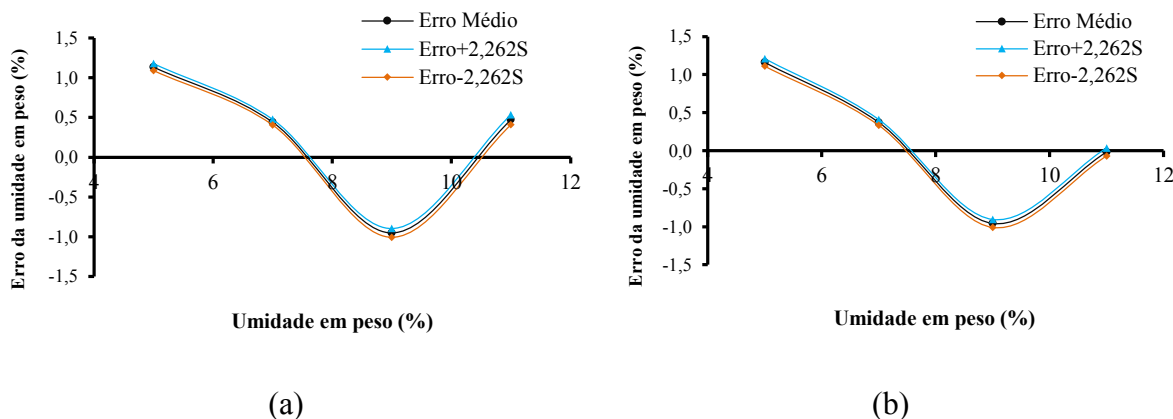


Figura 80 – Gráficos dos erros para a amostra 19 desconsiderando a granulometria (a) e considerando a granulometria (b).

Durante o processo de geração do gráfico de erros para o modelo geral, foi verificado que uma amostra estava aumentando muito o erro médio, e ao analisar cada amostra separadamente, foi identificado que a amostra 11 era a responsável por isso. Logo foi feita uma análise especificamente com essa amostra para verificar o motivo. Vale ressaltar que a amostra 11 foi a única amostra em que o software Minitab apontou como *outlier*, ou seja, uma amostra em que os resultados não se adequam ao modelo. Logo, ela foi retirada para o desenvolvimento do modelo

Primeiramente foi desenvolvido o gráfico de erros individual para essa amostra, de acordo com o modelo geral. O resultado é mostrado na Figura 87.

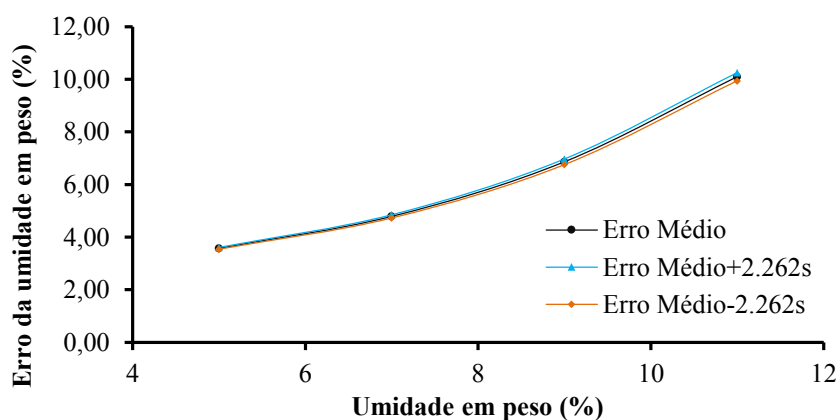


Figura 81 – Gráfico de erros para a amostra 11.

Para uma investigação mais aprofundada para entender o motivo, primeiramente foram analisados os dados da amostra, porém todos parecem bem coerentes: a resposta do sensor varia como esperado para diferentes umidades e compactações.

Foi analisado como os coeficientes angulares das retas dos gráficos da influência da densidade aparente para todas as amostras, considerando a equação geral de uma reta como sendo $y = Ax + B$, seguem um padrão de variação, como mostrado na Figura 82.

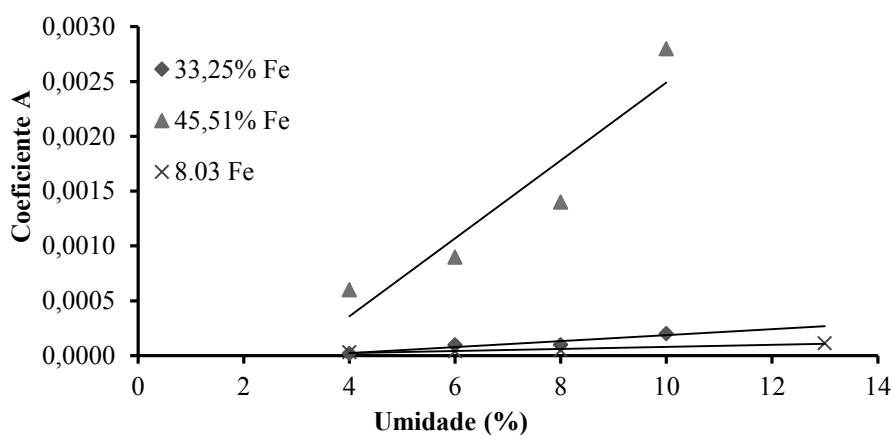


Figura 82 – Variação do coeficiente angular das retas dos gráficos de umidade em função da densidade aparente.

Analisando ainda como os coeficientes angulares desse novo gráfico variam, considerando agora a equação dessas retas como $y = Cx + D$, foi traçado o gráfico da Figura 83.

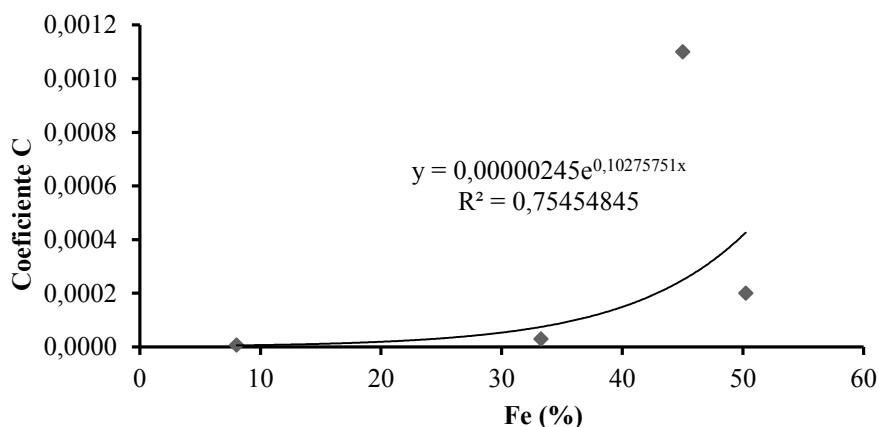


Figura 83 – Variação dos novos coeficientes angulares.

Nota-se claramente que os coeficientes angulares crescem exponencialmente, porém percebe-se um ponto completamente fora da curva, exatamente o ponto da amostra 11, que apresenta 45% de ferro.

Essa análise leva a deduzir que a caracterização em teor de ferro da amostra pode não estar correta. A fim de adequar o ponto à função exponencial, através de tentativa e erro modificando o valor do teor de ferro desse amostra, observou-se que para o valor de 57% de ferro, o ponto se adequa bem à curva exponencial como é mostrado na Figura 84. O coeficiente de determinação R^2 aumentou de 75% para 92%.

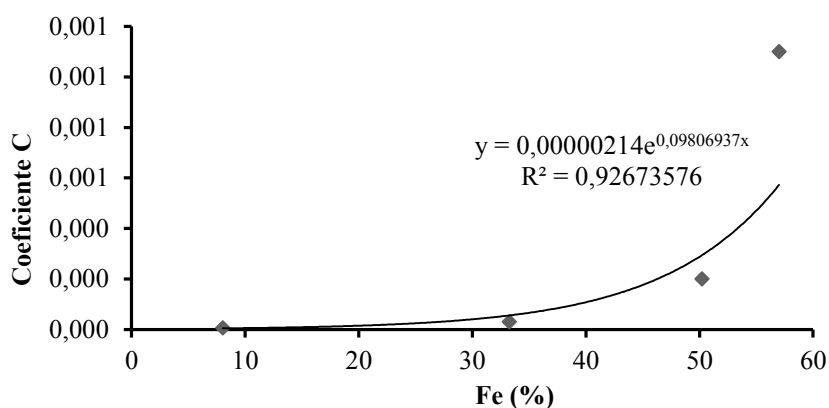


Figura 84 – Variação dos novos coeficientes angulares considerando a amostra 11 com 57% de ferro.

Traçou-se um novo gráfico de erro considerando esse valor de teor de ferro para essa amostra, e o resultado está apresentado na Figura 85.

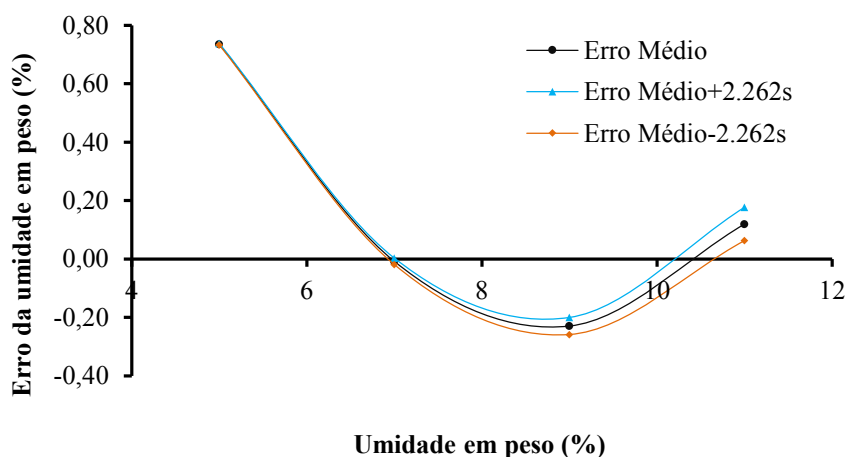


Figura 85 – Gráfico de erros para a amostra 11 considerando-a com 57% de teor de ferro.

O gráfico de erros ficou muito próximo aos erros apresentados pelas outras amostras, o que sugere que existiu um problema com a caracterização dessa amostra. Talvez ela possa ter sido trocada durante os experimentos, ou houve um erro na caracterização. No entanto, não é possível afirmar com certeza sem uma análise química especificamente nessa amostra. Porém, de acordo com o relatório gerado pela regressão no Minitab, essa amostra foi considerada um *outlier* no modelo gerado, então ela foi excluída para a geração do modelo. O modelo apresentado anteriormente foi gerado já excluindo a amostra 11.

Foi então gerado o gráfico dos erros para o modelo geral. O resultado do modelo que não utiliza a granulometria é mostrado na Figura 86 e o gráfico com a granulometria é mostrado na Figura 87.

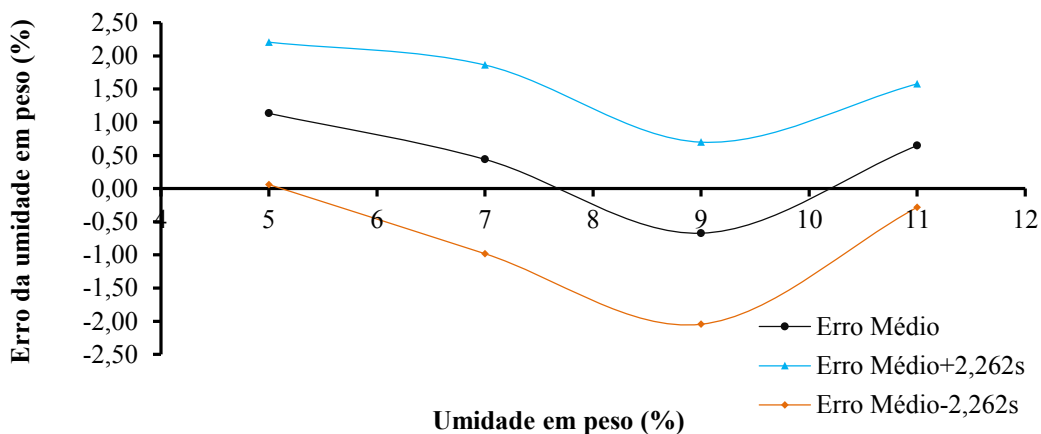


Figura 86 – Gráfico dos erros médios e desvios.

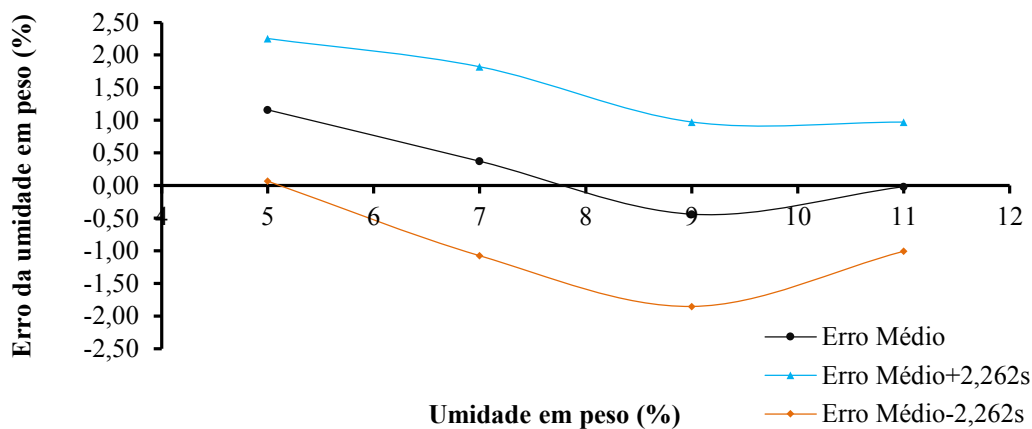


Figura 87 – Gráfico dos erros médios e desvios, considerando a granulometria.

Os erros médios para os dois foram em torno de 1%, com precisão de aproximadamente 1,4% (faixa entre o erro médio menos o desvio padrão e o erro médio mais o desvio padrão), ou seja, baixa precisão. Essa grande faixa e os erros são justificáveis principalmente devido à variação que ocorreu entre as densidades aparentes durante os experimentos, ou seja, como as densidades aparentes não foram exatamente as mesmas para diferentes amostras, o modelo gerado acaba ficando mais impreciso. O ideal seria fixar as densidades aparentes para cada umidade de todas as amostras, para que a influência da densidade aparente pudesse ser analisada isoladamente com mais precisão. Também existem os erros que acontecem durante o experimento, como erro de medição da balança e perdas durante o manuseio das amostras.

É possível verificar através dos gráficos que o sistema apresenta um erro sistemático em torno de $\pm 1\%$, o que pode ser corrigido facilmente via software. Já os erros aleatórios não são possíveis de serem corrigidos.

Como os modelos gerados levam em consideração o teor de ferro da amostra, essa variável pôde ser isolada no modelo para avaliar como o sistema responde, no caso de utilizar o teor de ferro como variável de interesse, em vez da umidade. Esse não era o objetivo do trabalho, mas o resultado foi analisado de forma simples apenas com o intuito de verificar a capacidade do sensor para essa funcionalidade.

6.6.7.3 Modelo para o teor de ferro

A elaboração do modelo, tomando-se o teor de ferro como variável de interesse foi realizada também com o auxílio do software Minitab.

É importante ressaltar que não houve amostras suficientes para a elaboração de um modelo específico para o teor de ferro como variável de interesse, visto que foram utilizadas apenas 5 valores diferentes de teor de ferro e uma variação não simétrica entre elas: 8%, 33%, 51%, 52% e 64%. O ideal seria utilizar ao menos o dobro desse número de amostras, ou seja, no mínimo 10, para garantir um modelo mais preciso. Porém isso não invalida o experimento, visto que a faixa de valores da amostra não foi ruim (8% a 64%).

Este tópico visa analisar a resposta do sensor tomando o teor de ferro como interesse, com intuito de realizar futuros estudos da utilização do sensor para essa finalidade. O modelo foi gerado e o gráfico de erros é mostrado na Figura 88.

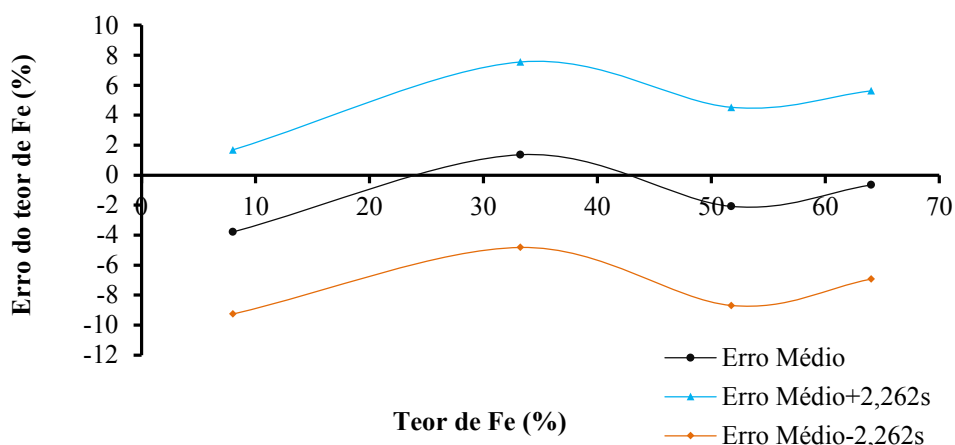


Figura 88 – Gráfico de erros para o teor de Fe.

O erro médio máximo ficou em torno de 3,78%, com precisão de 6,1% (faixa entre as curvas dos erros mais ou menos os desvios padrões). A amostra 11 foi novamente desconsiderada para esse modelo. Os erros foram maiores do que os verificados para o modelo para medir a umidade, que era o interesse deste trabalho. Porém nota-se que pode-se elaborar amostras e um estudo específico para a utilização do sensor para essa finalidade, pois apesar dos erros terem sido maiores, eles não foram muito grosseiros.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de estudar as metodologias de medição de umidade em minério de ferro e de desenvolver um sistema de baixo custo com esse propósito. Foram desenvolvidos diferentes protótipos a fim de corrigir e melhorar os resultados. As metodologias foram sendo modificadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, com o intuito de melhorar os resultados e analisar cada vez mais diferentes fatores que podem influenciar no resultado fornecido pelo sensor desenvolvido. Ao final, foi desenvolvido um modelo geral, considerando todas as variáveis importantes envolvidas no processo para medir a umidade em minérios de ferro e este modelo foi validado. Os erros médios encontrados ficaram em torno de 1%, e a grande variabilidade foi justificada. Como mencionado, é possível que se diminuam ainda mais os erros encontrados, utilizando-se mais amostras para o experimento e padronizando-se melhor a densidade aparente. A inclusão de diferentes amostras com diferentes granulometrias e densidades aparentes também podem melhorar ainda mais os resultados.

O modelo matemático desenvolvido que relaciona a resposta do sensor (que está diretamente relacionada com a constante dielétrica) com o teor de ferro, a umidade, a densidade aparente e a granulometria, contribui fortemente para pesquisas nesta área, já que foi verificado que essas variáveis afetam também a resposta de outros sensores desenvolvidos para essa finalidade. Com a análise realizada e o modelo desenvolvido, é esperado que de fato a pesquisa possa ajudar a desenvolver pesquisas voltadas para a medição da umidade em minérios de ferro, mesmo que utilizando outras técnicas além do circuito baseado em ponte autobalanceada.

Como desvantagem do método, para que se possa medir com boa precisão a umidade, é realmente necessário ter previamente as informações do teor de ferro, da densidade aparente e da granulometria da amostra. Para a densidade aparente pode-se desenvolver um sistema automatizado para padronizá-la, porém o teor de ferro e a granulometria se fazem necessários. Como foi mostrado no trabalho, o modelo para minérios finos (granulometria menor que 6300 μm) pode ser utilizado sem saber a granulometria correta do minério, e o resultado apresentou um erro médio de apenas 1%. Porém, foi observado que o teor de ferro influencia muito no resultado, então é essencial que essa informação seja conhecida e inserida como parâmetro no sensor, através do software supervisor por exemplo, para que o valor da umidade seja calculada e fornecida corretamente.

Um resultado importante e positivo do trabalho, foi que para a faixa de umidade de interesse da Vale, entre 7% e 13%, foi a faixa com menor erro fornecido pelo sensor. Não foi possível efetuar análises para faixas maiores que 13%, pois não foram criadas amostras para essa finalidade. Outro resultado que foi encontrado e não esperado no trabalho, foi a grande influência do teor de ferro na resposta do sensor, porém essa foi quantificada e considerada no modelo desenvolvido.

O sensor foi desenvolvido para servir como um instrumento de bancada, não sendo possível ser instalado em campo para realizar a medição da umidade online. O sensor foi desenvolvido para ser utilizado em laboratório e para realizar medições através de amostragens.

Foi verificado que o sensor pode ser calibrado e utilizado para medir também o teor de ferro das amostras. Para essa finalidade são necessários experimentos específicos para analisar a real eficiência do equipamento.

Os resultados se mostraram promissores para aplicação em processos de mineração. O baixo custo de produção do equipamento também é um fator positivo e de grande importância para a viabilidade de transformá-lo em um produto para o mercado.

8 TRABALHOS FUTUROS E RECOMENDAÇÕES

Propõe-se para trabalhos e análises futuras a elaboração de mais amostras variando-se a granulometria, teores de ferro e densidade aparente para melhor ajuste do modelo. Amostras com umidades acima de 13% também podem melhorar o modelo e, dessa forma, saber o real comportamento do sensor para essa faixa ampliada.

Um estudo aprofundado para a adaptação do método para o desenvolvimento de um sensor que possa ser instalado diretamente no processo e que possa fazer a medida da umidade online seria um avanço muito grande.

Como citado anteriormente, fazer um estudo com o método e o modelo desenvolvido para medir o teor de ferro também poder ser um grande avanço, visto que os equipamentos que fazem esse tipo de medição utilizam os métodos de raio-X. Esses equipamentos são muito caros, e têm o manuseio complexo e manutenção limitada às empresas que fornecem o equipamento.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. AMOOZEGAR, K.C. MARTIN, M. T. H. **Effect of access hole properties on soil water content determination by neutron thermalisation** Soil Sci. Soc. Am. J. 53, , 1989. .

A.L. KALEITA, L.F. TIAN, M. C. H. **Relationship between soil moisture content and soil surface reflectance** Trans. ASAE 48 (5), , 2005. .

A.N. ELDER, T. C. R. **Neutron probe calibration in unsaturated tuff** Soil Sci. Soc. Am. J. 58, , 1994. .

ABNT. **NBR 6457 - Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização** Rio de Janeiro, 2016. .

ABRÃO, G. S.; MARINHO, F. A. M. **Retenção de água em minério de ferro**. 2005. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

AGILENT. Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. **Measurement Techniques**, v. 2007, p. 32, 2005. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Basics+of+Measuring+the+Dielectric+Properties+of+Materials#2>>.

ALWIS, L.; SUN, T.; GRATAN, K. T. V. Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 10, p. 4052–4074, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.030>>.

ASTM D 4944. **Standard Test Method for Field Determination of Moisture (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester** West Conshohocken, PA ASTM International, , 2008. .

B.H. RAO, D. N. S. **Moisture content determination by TDR and capacitance techniques: a comparative study** Int. J. Earth Sci. Eng. 4 (6), , 2011. .

BRIGGS, L. **The Mechanics of Soil Moisture**. Washington: Government Printing Office, 1897.

BUCKINGHAM, E. **Studies of the movement of soil moisture**. Washington, DC: US Gov Print Office, 1907.

C. GARDNER, T. DEAN, J. C. **Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor**J. Agric. Eng. Res. 71 (2), , 1997. .

CHAVANNE, X.; BRUÈRE, A.; FRANGI, J.-P. Comments to: A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils , *Sensors* , 15 , 25546-25563. p. 1–14, 2017.

CUTMORE, N. G.; EVANS, T. G.; MCEWAN, A. J.; ROGERS, C. A.; STODDARD, S. L. Low frequency microwave technique for on-line measurement of moisture. **Minerals Engineering**, v. 13, n. 14–15, p. 1615–1622, 2000.

D.A. ROBINSON, C.S. CAMPBELL, J.W. HOPMANS, B.K. HORNBUCKLE, S. B.; JONES, R. K. Soil moisture measurement for ecological and hydrological moisture shed-scale observatories: a review. **Vadose Zone J.** 7 (1), p. 358–389, 2008.

F.S. ZAZUETA, J. X. **Soil Moisture Sensors, Florida Cooperative Extension Service**Gainesville Bulletin 292, Inst. Food and Agricultural Sciences, , 1994. .

FERREIRA, J. D. C. **ESTUDOS SOBRE DRENAGEM E REDUÇÃO DE UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS COM A UTILIZAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS.** 2009. 2009.

G.C. TOPP, J.L. DAVIS, A. P. A. **Electromagnetic determination of soil moisture content: measurements in coaxial transmission lines**Moisture Resour. Res. 16, , 1980. .

G.J. GASKIN, J. D. M. **Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique**J. Agric. Eng. Res. 63 (1), , 1996. .

GAMIO J.C., YANG W.Q., S. A. . **Analysis of non-ideal characteristics of an ac-based capacitance transducer for tomography**Measurement Science and Technology 12, , 2001. .

GARDNER, W. **The capillary potential and its relation to soil moisture constants.** [s.l.] Soil Sci. 10, 1920.

GENTILINI, J. C. **O Comportamento de Dielétricos na Presença de Cmapos Elétricos e a Sua Descrição em Termos da Função Resposta Dielétrica.** 2012. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

Glass fiber tubes used in soil moisture sensors. Disponível em: <<https://www.materialstoday.com/carbon-fiber/news/glass-fiber-tubes-used-in-soil-moisture->

sensors/>. Acesso em: 16 mar. 2018.

H.Y. FANG, J. L. D. **Introductory geotechnical engineering – an environmental perspective**, Taylor and Francis. [s.l: s.n.]

HILLEL, D. **Introduction to Soil Physics**. Orlando, Florida: Academic Press, 1982.

IR-3000 Online Moisture Transmitter. Disponível em: <<http://www.jwii.com.au/product/ir-3000-online-moisture-transmitter/>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

J.A. WIDTSOE, W. W. M. **The movement of water in irrigated soils**. [s.l.] Utah Agr. Exp. Sta. Bull. 115, 1912.

J. MINET, S. LAMBOT, G. DELAIDE, J.A. HUISMAN, H.A. VEREECKEN, M. A.; VANCLOOSTER. **Generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination** Vadose Zone J. 9, , 2010. .

J.R. WHALLEY, T.J. DEAN, P. J. I. **Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content**J. Agric. Eng. Res. 52, , 1992. .

JACKSON, T.; MANSFIELD, K.; SAAFI, M.; COLMAN, T.; ROMINE, P. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 41, n. 4, p. 381–390, 2008.

K. GIESE, R. T. **Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: improved analysis of the step response waveform**Adv. Mol. Relax. Interact. Proc. 7, , 1975. .

K. NOBORIO, K.J. MCINNES, J. L. H. **Measurements of soil moisture content, heat capacity and thermal conductivity with a single TDR probe**Soil Sci. 161, , 1996. .

KAATZE, U.; FELDMAN, Y. **Broadband dielectric spectrometry of liquids and biosystems**Measurement Science and Technology 17 R17-R35, , 2006. .

KARL TERZAGHI. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: John Wiley and Sons Inc., 1943.

LETEY, J. **Relationship between soil physical properties and crop production**. [s.l.] Adv. Soil Sci. 1, 1985.

M. ROBINSON, T. J. D. **Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe**Hydrol. Process. 7, , 1993. .

M.S. SEYFRIED, L.E. GRANT, E. DU, K. H. **Dielectric loss and calibration of the hydra probe soil water sensor**Vadose Zone J., , 2005. .

M.T. JULIE, M. H. J. **Measuring soil moisture content in the laboratory and field with dual probe heat capacity sensors**Agron. J. 89 (4), , 1997. .

MACDONALD, J. R. **Impedance Spectroscopy**New YorkJohn Wiley & Sons, , 1987. .

MANTENUTO, P.; MEMBER, S.; MARCELLIS, A. De; FERRI, G.; MEMBER, S. Novel Modified De-Sauty Autobalancing Bridge-Based Analog Interfaces for Wide-Range Capacitive Sensor Applications. v. 14, n. 5, p. 1664–1672, 2014.

MCGOWN, G. **Online moisture analysis in materials handling**. Disponível em: <<https://www.processonline.com.au/content/materials-handling-logistics/article/online-moisture-analysis-in-materials-handling-955701151>>. Acesso em: 4 abr. 2018.

Mesh-protected Weather-proof Temperature/Humidity Sensor - SHT10. Disponível em: <<https://www.adafruit.com/product/1298>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

MOLINA, W. F. J. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas**. [s.l: s.n.]

MOREIRA, T. B. G. **AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM COM GEOSSINTÉTICOS PARA DIMINUIÇÃO DA UMIDADE NO MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DE CARAJÁS**. 2008. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2008.

MUÑOZ-CARPENA, R. **Field devices for monitoring soil water content**.Extension Bulletin 343, Dept. of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, , 2009. .

N. WAGNER, A. S. On the relationship between matric potential and dielectric properties of organic free soils: a sensitive study. **Can. Geotech. J.** 46, p. 1202–1215, 2009.

N.J. JARVIS, P. B. L.-H. **Some problems associated with the use of the neutron probe in swelling/ shrinking clay soils**J. Soil Sci. 38, , 1987. .

N.S. JAYAWARDANE, W.S. MEYER, H. D. B. **Moisture measurement in a swelling clay soil using neutron moisture meters**. [s.l.] Aust. J. Soil Res. 22, 1989.

NOBORIO, K. **Measurement of soil moisture content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review**Comput. Electron. Agric. 31, , 2001. .

R.S. ALESSI, L. P. **Soil water determination using fiber optics**Soil Sci. Soc. Am. J. 50, ,

1986. .

RÊGO SEGUNDO, A. K. **Desenvolvimento De Um Sistema De Controle Automático Para Processo De Irrigação E Fertirrigação**. 2014. Universidade Federal de Viçosa, 2014.

RÊGO SEGUNDO, A.; MARTINS, J.; MONTEIRO, P.; DE OLIVEIRA, R.; FREITAS, G. A Novel Low-Cost Instrumentation System for Measuring the Water Content and Apparent Electrical Conductivity of Soils. **Sensors**, v. 15, n. 10, p. 25546–25563, 5 out. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/10/25546>>. Acesso em: 6 out. 2015.

SANTOS, V. R. N. dos. **Radar de Penetração no Solo e Meio Ambiente** São Paulo UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, , 2013. .

SEGUNDO, A. K. R.; SILVA, M. J. da; FREITAS, G. M.; MONTEIRO, P. M. de B.; MARTINS, J. H. Reply to Comments: A low-cost instrumentation system for measuring water content, apparent electrical conductivity and temperature of the soil. **Sensors**, v. 14, n. i, p. 1–10, 2018. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/sensors>.

SILVA, I. O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo**. 2005. Universidade Federal do Ceará, 2005.

SILVA, M. J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging. Doctoral Thesis**. 2008. 2008.

Smart Agriculture Sensors: Helping Small Farmers and Positively Impacting. Disponível em: <<https://eu.mouser.com/applications/smart-agriculture-sensors/>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

SUSHA LEKSHMI, S. U.; SINGH, D. N.; SHOJAEI BAGHINI, M. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92–105, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114001651>>.

T. JACKSON, K. MANSFIELD, M. SAAFI, M. COLMAN, P. R. **Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors** Measurement 41, , 2008. .

TDR100 SOIL MOISTURE METER. Disponível em: <<https://www.enviromonitors.co.uk/shop/tdr100-soilmoisture>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

TRABELSI, S.; LEWIS, M. A.; NELSON, S. O. Microwave moisture meter for in-shell peanut kernels. **Food Control**, v. 66, p. 283–290, 2016. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.02.016>>.

V.A. RINALDI, F. M. F. **Impedance analysis of soil dielectric dispersion (1MHz-1GHz)**J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 125 (2), , 1999. .

VALE. **Relatório Anual 2017**. [s.l: s.n.].

VÁRALLYAY, G. **Soil Scientific Basis of Agricultural Water Management**. Disponível em: <http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0009_Varallyay_Gyorgy-Soil_Scientific_Basis_of_Agricultural_Water_Management/ch06s04.html>. Acesso em: 15 mar. 2018.

VRIES, D. A. De. **Thermal Properties of Soil, Physics of Plant Environment**New YorkJohn Wiley and Sons, , 1963. .

ZAZUETA, F.S., J. X. **Soil Moisture Sensors**GainesvilleInst. Food and Agricultural Sciences, University of Florida, , 1994. .

ZERIZGHY, M.; VAN RENSBURG, L.; ANDERSON, J. Comparison of neutron scattering and DFM capacitance instruments in measuring soil water evaporation. **Water SA**, v. 39, n. 2, p. 183–190, 2013. Disponível em: <<http://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/88079>>.

1 APÊNDICE A – Métodos de Medição de Umidade

1.1 Dispersão de nêutrons (NMM)

Os medidores de umidade por meio de nêutrons (*Neutron Moisture Meters* - NMM) utilizam a dispersão de nêutrons como método de medição volumétrica da umidade (N.S. JAYAWARDANE, W.S. MEYER, 1989). Os NMM atuam com uma fonte radioativa de emissão de nêutrons rápidos (~ 0.025 eV a 27°C), com grande energia (5 MeV) e baixa força relativa (0.37 ou 1.85 Giga Becquerel) (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). Por se tratar de um equipamento com material radioativo, requer treinamento de segurança para o seu manuseio, monitoramento e regulação para transporte e aquisição. Existem dois tipos de NMM: um que mede a umidade na superfície, apenas mantendo o contato com ela; e outro que mede a umidade do perfil do material, através de uma sonda metálica inserida nele (cerca de 0,3m de profundidade), conectada via cabo ao centro de processamento do equipamento. Neste sistema, uma caixa fica externa ao material, contendo os equipamentos eletrônicos necessários para o correto funcionamento, como microprocessadores, fonte de tensão, interface homem máquina, entre outros (N.S. JAYAWARDANE, W.S. MEYER, 1989).

A medição do perfil de umidade por meio da sonda de nêutrons é muito utilizada na agricultura. O equipamento possui o seguinte princípio de funcionamento: os nêutrons rápidos e com grande energia, que são emitidos pela sonda através da fonte radioativa, são desacelerados devido à colisão com os núcleos de hidrogênio presentes no solo. Como a grande maioria desses átomos de hidrogênio presentes no solo são moléculas de H_2O , devido à umidade (A. AMOOZEGAR, K.C. MARTIN, 1989; A.N. ELDER, 1994), cria-se uma relação entre os nêutrons lentos e a umidade. O conjunto dos neutros lentos formam uma densa nuvem que tem o seu tamanho e densidade aparente medidas pelo equipamento. Como a proporção de nêutrons lentos é proporcional à umidade presente no meio poroso, tem-se uma relação direta para a estimativa da umidade. Visto que podem conter outros materiais no solo que contém hidrogênio como materiais orgânicos e argila (RÊGO SEGUNDO, 2014), o resultado pode apresentar pequenas imprecisões.

Além de ser um método rápido, com resposta entre 1min e 2min, ele é considerado o método mais preciso para a medição de umidade (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014), oferece a possibilidade de se obter um perfil de umidade de grandes terrenos,

através de diversas medições e é um método não destrutivo, podendo-se medir a mesma amostra diversas vezes.

Este método tem como grandes desvantagens o alto custo de aquisição do equipamento e o alto risco à saúde devido à exposição à radiação (N.J. JARVIS, 1987). É também um equipamento pesado e, portanto, de difícil manuseio para a realização de medições em diferentes pontos de interesse. Na Figura 88 mostra-se uma foto do equipamento sendo utilizado em campo.

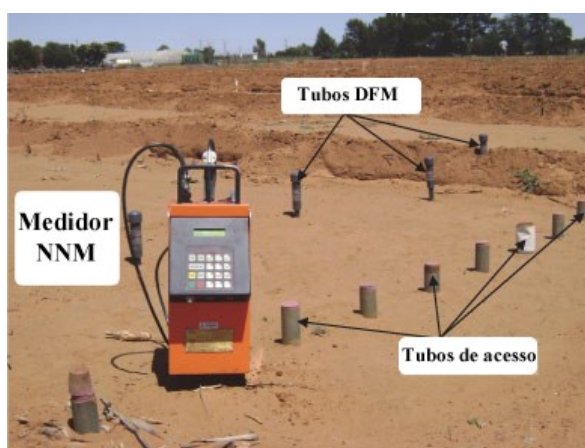


Figura 89 – Foto de um equipamento em campo.

Fonte: ZERIZGHY *et al*, 2013.

Os tubos de acesso são inseridos inicialmente de acordo com a definição do perfil de interesse de umidade do terreno e, então, o equipamento é movimentado e conectado aos tubos, um a um. Os tubos DFM, exibidos na Figura 83, não são utilizados pelo equipamento. Eles são utilizados pelo método capacitivo, que será abordado posteriormente.

1.2 Atenuação gama

O método de atenuação gama é um método radioativo e restrito a solos com profundidade de 25mm. Para o uso dessa técnica, assume-se que a dispersão e absorção dos raios gama estão relacionados à densidade aparente da matéria por onde esses raios passam. Considera-se também que as forças de interações internas do solo, como por exemplo as forças capilares, permanecem constantes à medida que a densidade muda com o aumento ou diminuição da umidade (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

A umidade é determinada com base na alteração da densidade saturada, medida por meio dos raios gama. Trata-se de um método não destrutivo, realizado em laboratório, e que fornece

a umidade volumétrica em cerca de 1 min, porém, a densidade aparente do solo pode alterar o resultado.

A técnica do raios gama é mais perigosa de se trabalhar do que o método NMM e o custo é mais elevado (ZAZUETA, F.S., 1994). Na Figura 90 mostra-se um esquemático do sensor.

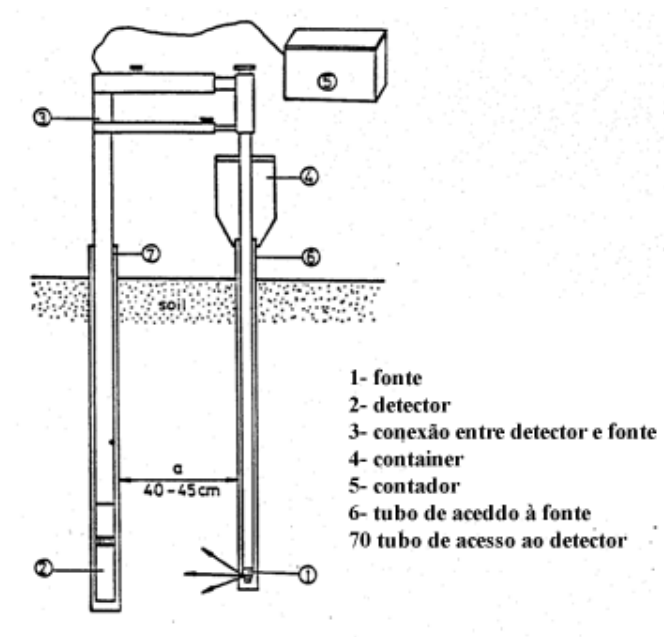


Figura 90 – Esquemático do sensor por raio gama.

Fonte: VÁRALLYAY, 2003.

1.3 Radar por penetração no solo (GPR)

Utilizando ondas eletromagnéticas de alta frequência (1 MHz - 1 GHz), a técnica de radar por penetração, ou *Ground Penetration Radar* (GPR), mensura o tempo de reflexão dessas ondas no solo, que varia de acordo com a permissividade. A onda é gerada pelo equipamento, viaja através do meio poroso e é refletida para o equipamento que mede e correlaciona o tempo de reflexão com a constante dielétrica, e, por fim, com a umidade. Trata-se de uma técnica não invasiva, com alta resolução para estimar a constante dielétrica da superfície e sub-superfícies de diversos tipos de materiais, como o solo. Como desvantagens, esse método não apresenta bons resultados em solos com alto grau de salinidade, já que existe uma atenuação do sinal devido ao aumento da condutividade elétrica maior que 1 dS.m^{-1} (D.A. ROBINSON, C.S. CAMPBELL, J.W. HOPMANS, B.K. HORNBUCKLE; JONES, 2008; SUSHI LEKSHMI;

SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). Na Figura 91 mostra a utilização de um equipamento do tipo GPR em campo, durante um curso da Universidade Federal de São Paulo.



Figura 91 – Equipamento do tipo GPR em campo.

Fonte: SANTOS, 2013.

1.4 Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)

Sistemas microeletromecânicos ou *Micro Electro Mechanical System* – MEMS, é o nome utilizado para denominar a tecnologia que integra em um mesmo chip elementos sensores, atuadores ou sistemas mecânicos desenvolvidos com nanotecnologia. Os sistemas desse tipo, utilizados para a medição de umidade são compostos por um nanossensor e uma ponte de *Wheatstone* com piezorresistores, que medem microdeformações no elemento sensor, formadas por uma espécie de nanoviga que se deforma. O sensor possui um microfilme proprietário, desenvolvido a base de um nanopolímero que se expande quando em contato com nanopartículas de água ou vapor de água. Esse filme, inserido no topo da nanoviga, ao dilatar, em contato com vapor de água, deforma-a. Essa deformação é medida pelo piezorresistor e transmitida em forma de diferença de potencial pela ponte de *Wheatstone*. (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

A temperatura é monitorada internamente pelo chip, e a variação na resistência do sensor depende da elasticidade e da espessura da nanoviga, bem como da quantidade de umidade presente no meio a ser medido (T. JACKSON, K. MANSFIELD, M. SAAFI, M. COLMAN,

2008). Ainda é um método recente e que os estudos da sua aplicação em diferentes solos precisa ser desenvolvida. As Figura 92 e Figura 93 mostram-se o esquemático dos sensores tipo MEMS.

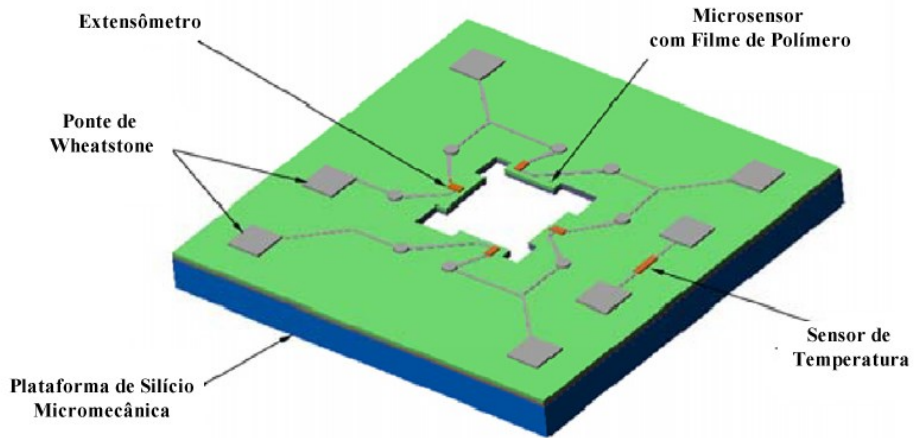


Figura 92 – Chip de um sistema micro mecânico – MEMS.

Fonte: adaptado de JACKSON *et al.*, 2008

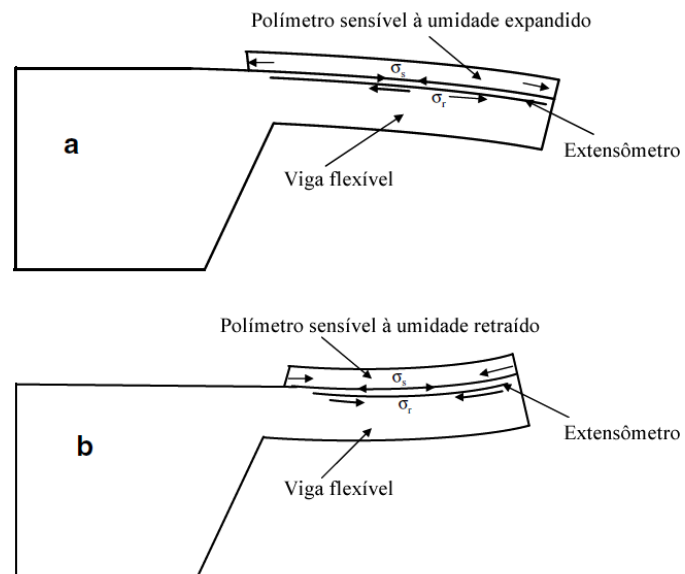


Figura 93 – Vista da viga micromecânica presente nos sensores tipo MEMS.

Fonte: adaptado de JACKSON *et al.*, 2008

1.5 Resistividade

Devido à condutividade da água quando em meio salino, a condutividade dos meios porosos aumenta à medida que a umidade aumenta, ou pode-se dizer que a resistividade diminui. A resistividade do solo, por exemplo, pode ser medida por meio da estimativa da resistividade entre eletrodos imersos nele ou por meio da resistividade de um material em equilíbrio com o solo (D.A. ROBINSON, C.S. CAMPBELL, J.W. HOPMANS, B.K. HORNBUCKLE; JONES, 2008; SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

Um dos métodos mais utilizados contempla a aplicação de blocos porosos que formam uma matriz granular e contêm dois eletrodos conectados através de um cabo. Os blocos podem ser de gesso, cerâmica, nylon ou fibra de vidro.

A umidade percorre os poros do bloco, quando imerso no solo, até que entre em equilíbrio com o meio. Os diferentes materiais dos blocos possuem diferentes resistências às tensões de água no solo, tornando-os eficientes para uma grande gama de texturas (RÊGO SEGUNDO, 2014).

A resistência é medida entre os eletrodos, por meio de um microprocessador, e relacionada com a umidade. A curva de calibração entre resistividade e umidade deve ser desenvolvida previamente.

A vantagem deste método é o baixo custo, e a desvantagem é a necessidade de calibração individual para cada solo, além de ser muito sensível a solos salinos (F.S. ZAZUETA, 1994). A Figura 94 mostra um equipamento que utiliza o método resistivo para a medição da umidade em meio poroso.



Figura 94 – Sensor de matriz granular.

Fonte: RÊGO SEGUNDO, 2014.

1.6 Dissipação térmica e fluxo de calor

O método por dissipação térmica ou fluxo de calor se baseia no princípio de condutividade de calor para medir a umidade volumétrica do meio.

O método consiste na utilização de uma sonda com dois eletrodos, um elemento aquecedor e um sensor de temperatura. O método, também é conhecido por pulso de calor por sonda dupla, ou *Dual Probe Heat Pulse (DPHP)*. O equipamento gera pulsos instantâneos de calor e o aquecimento é mensurado por uma curta distância da fonte emissora, e é inversamente proporcional à capacidade calorífica volumétrica do meio poroso, que por sua vez é proporcional à umidade volumétrica (K. NOBORIO, K.J. MCINNES, 1996; M.T. JULIE, 1997).

A umidade θ volumétrica de um material com densidade aparente conhecida pode ser calculada por meio das Equações (43 e (44 (VRIES, 1963):

$$\rho c_p = \frac{q}{\pi e r^2 \Delta T_m} , \quad (43)$$

$$\rho c_p = 1,92 X_m + 2,50 X_0 + 4,18\theta , \quad (44)$$

em que X_m , X_0 e θ (%) são as contribuições volumétricas de componentes minerais e orgânicos e umidade, respectivamente; ρ é a densidade aparente do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); c_p é o calor específico do solo ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); e é a base logarítmica natural; q é energia aplicada por unidade de calor (J); r é a distância entre o aquecedor e o sensor de temperatura (m); ΔT_m é o aumento máximo da temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

As principais vantagens desse método são a ampla faixa de medição, além de suas medidas não serem influenciadas pela salinidade ou condutividade do material. Ele apresenta como desvantagens o tempo de resposta alto e alto consumo de energia ao realizar-se várias leituras (RÊGO SEGUNDO, 2014).



Figura 95 – Sensor que utiliza a técnica de dissipação de calor.

Fonte: Adafruit, 2018.

1.7 Tensiômetro

O tensiômetro foi um dos primeiros equipamentos criados para medir a tensão capilar em solos. Ele é formado por um material cerâmico poroso, completamente cheio de água, imerso no solo a qualquer profundidade, e fornece indiretamente a umidade do solo. (RÊGO SEGUNDO, 2014; SUSHALAKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). O material cerâmico está conectado a um tubo contendo ar, e este tubo está conectado a um medidor de vácuo, ou vacuômetro. Quando o material cerâmico entra em contato com o solo, a água interna do sensor entra em equilíbrio com a água externa contida no solo, através dos poros. Para que o equilíbrio ocorra, a água do sensor pode ser sugada para o solo, causando, neste caso, uma pressão hidrostática negativa no tubo de ar do equipamento, e sendo indicada pelo medidor de vácuo.

Como desvantagens deste método, além do tempo de resposta ser lento, o equipamento fornece leituras apenas entre 0 e 1 atm, o que não cobre toda a faixa disponível de umidade. O equipamento também requer manutenção regular para manter a água dentro do tubo de ar. Por outro lado, o equipamento apresenta baixo custo, é fácil de ser instalado e não requer energia elétrica para funcionar.

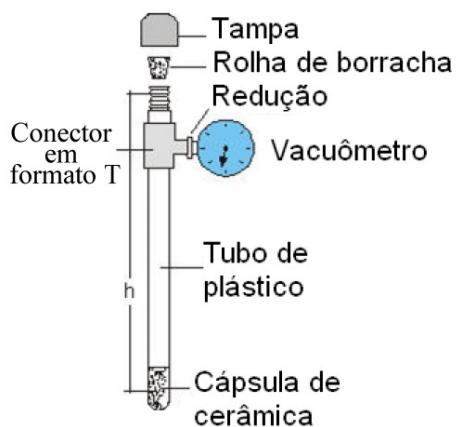


Figura 96 – Esquemático de um tensiômetro (a) equipamento em campo (b).

Fonte: RÊGO SEGUNDO, 2014.

1.8 Ópticos

Os métodos ópticos utilizam o fato de que as características de um feixe de luz incidente e refletido se alteram quando viajam através da massa de um meio poroso. Estão contidos nestes métodos técnicas que utilizam fibra ópticas, luz polarizada e sensores de infravermelho (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

1.8.1 Técnica utilizando luz polarizada

A técnica de luz polarizada se baseia no fato de que, havendo umidade na superfície do meio poroso, um feixe de luz incidente tende a se polarizar quando refletido. A técnica segue o seguinte procedimento: uma luz monocromática é direcionada ao material com a umidade de interesse. Essa luz é refletida pelo material e passa de um polarizador para uma fotocélula. Sinais horizontalmente e verticalmente polarizados são formados após o polarizador e mensurados pela fotocélula. A umidade está relacionada com a luz visível, determinada pelas duas medidas realizadas (R.S. ALESSI, 1986; A.L. KALEITA, L.F. TIAN, 2005; D.A. ROBINSON, C.S. CAMPBELL, J.W. HOPMANS, B.K. HORNBUCKLE; JONES, 2008). Este tipo de equipamento necessita ser calibrado para diferentes tipos de solos. Na Figura 97 mostra-se um pequeno sensor desse tipo disponível no mercado.

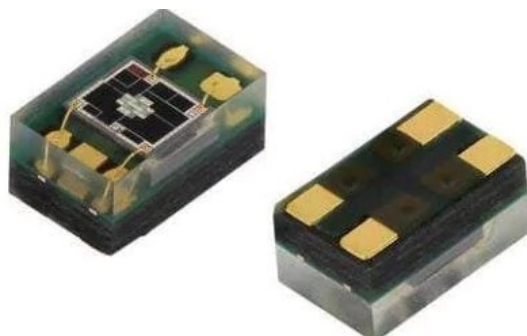


Figura 97 – Sensor óptico utilizado no setor agrônomo.

Fonte: Mouser Electronics, 2018

1.8.2 Técnica utilizando fibra óptica

A técnica por fibra óptica utiliza o fato de que a quantidade de umidade presente em um meio poroso atenua de forma diferente a luz em uma fibra óptica descascada e imersa nesse meio. A quantidade de umidade afeta diretamente o ângulo crítico de reflexão interna da luz emitida pela fibra, bem como o índice de refração (R.S. ALESSI, 1986; A.L. KALEITA, L.F. TIAN, 2005; D.A. ROBINSON, C.S. CAMPBELL, J.W. HOPMANS, B.K. HORNBUCKLE; JONES, 2008; SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). Na Figura 98 mostra-se um esquemático do funcionamento do sensor que utiliza a fibra óptica para medir a umidade em solos.

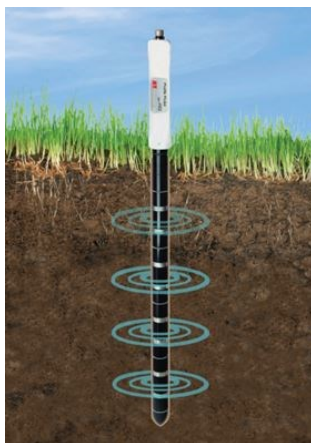


Figura 98 – Esquemático mostrando o princípio de funcionamento do sensor por fibra óptica.

Fonte: Materials Today, 2018.

1.9 Sensor de infravermelho

O método utilizando o sensor de infravermelho utiliza o fato em que existem diversas bandas de absorção desse comprimento de onda quando um raio infravermelho incide em um material poroso, devido à umidade. Os feixes mais absorvidos têm o comprimento de onda em torno de 1450, 1940 e 2950 nm (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). A absorção molecular pela umidade, acontece em comprimentos de ondas distintos e somente nas camadas superficiais. O método não exige contato com o meio poroso, e fornece uma resposta rápida, porém depende das características do material.

Em aplicações para se determinar a umidade de solos, e nos casos em que a medida é feita em campo, e não por meio de uma amostra, a vegetação restringe o reflexo do feixe infravermelho, e a medida se torna mais imprecisa. Estudos aprofundados realizados nas técnicas envolvendo sensores baseados em fibra óptica e infravermelho para estimar a umidade mostram que esses métodos possuem grandes vantagens em relação aos outros citados, como imunidade à interferência eletromagnética, utilizam equipamentos mais leves, possuem estabilidade térmica e são eficientes para sensoriamento remoto (ALWIS; SUN; GRATTAN, 2013). Os sensores de fibra óptica foram profundamente estudados para a aplicação na medição de umidade, porém sua aplicação em diferentes solos, com diferentes características, perfil de umidade, e dependência da temperatura ainda precisam ser explorados (SUSHA LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

Na Figura 99 mostra-se um equipamento disponível no mercado que utiliza o princípio de infravermelho para medição de umidade voltado para o setor alimentício.



Figura 99 – Sensor de umidade que utiliza o método de infravermelho.

Fonte: JWII, 2018.

1.10 Micro-ondas

Técnicas baseadas em micro-ondas para medição de umidade começaram a ser estudadas por volta da década de 1960. A técnica se baseia no envio de ondas na faixa de micro-ondas (1 GHz a 10 GHz) e o equipamento mede a amplitude e/ou a diferença de fase da onda refletida em relação à onda enviada, sem exigir contato com o meio. Através da diferença de fase ou da atenuação, é possível medir as propriedades dielétricas do meio em que a onda foi refletida (TRABELSI; LEWIS; NELSON, 2016).

Existem dois tipos básicos de sensores de micro-ondas para umidade, sendo que um tipo possui uma antena transmissora e uma receptora onde o material fica entre as antenas. Já o outro tipo a antena transmissora e receptora se encontram no mesmo plano, de forma que o material não necessita estar entre as antenas. A maior parte da atenuação da onda é devido às partículas de água, por possuírem maior constante dielétrica do que os outros tipos de material (MCGOWN, 2009).

Estudos mostram que a técnica em que se utiliza o diferença de fase fornecem resultados mais precisos do que as técnicas que fazem a análise da variação da amplitude da onda (CUTMORE et al., 2000). Os resultados para esse tipo de equipamento foram satisfatórios para aplicações para medir a umidade na faixa de 10% a 20% em usinas de carvão, com 50mm a 200mm de espessura, porém para minérios, o resultado é bastante afetado pelas diferentes camadas presentes no material, quando possui alta umidade ou alto teor de ferro, o que aumenta muito a atenuação, e quando essa ultrapassa de 50dB, o erro passa a ser grande.

Os equipamentos que utilizam a técnica de micro-ondas possuem a vantagem de não necessitarem de contato com o meio na qual pretende-se medir a umidade, porém a variação do nível do minério bem como a densidade influenciam muito no resultado fornecido. Técnicas tem sido desenvolvidas para tentar solucionar esse problema, como por exemplo a implantação de transportador em rosca para tentar manter a densidade, mas ainda assim existem muitas variações. O custo do equipamento também é elevado.

Uma diferença entre o sensor de infravermelho e o sensor de micro-ondas é que o infravermelho mede apenas a superfície do material, enquanto o sensor de micro-ondas consegue medir um volume maior do material. A Figura 100 mostra um sensor do tipo micro-ondas de baixa frequência (LFM), instalado em uma correia transportando minério de ferro.

Esse tipo de sensor de micro-ondas, permite através do uso de baixa frequência, uma penetração no meio com uma atenuação menor do sinal, mas ainda é bastante sensível à densidade.



Figura 100 – Sensor instalado na correia transportadora onde as antenas de transmissão e recepção estão no mesmo plano.

Fonte: MCGOWN, 2009.

Na Figura 101 mostra-se um sensor de micro-ondas utilizado para medir umidade em grãos de amendoim, em que os grãos ficam entre as antenas.



Figura 101 – Sensor do tipo micro-ondas onde o material se encontra entre as antenas.

Fonte: TRABELSI *et al*, 2016.

2 APÊNDICE B – Dados dos Experimentos para Calibração

Umidade	Teor de Fe (%)	Resp. do Sensor (ganho)	Densidade aparente (kg.m3)	Granulometria (µm)
4	33,25	0,05689144	2061,94599052	243,52
4	33,25	0,05714153	2077,68603625	243,52
4	33,25	0,05747339	2093,66823653	243,52
6	33,25	0,06077397	1981,72235927	243,52
6	33,25	0,06112314	1995,97935466	243,52
6	33,25	0,06399523	2010,44297318	243,52
6	33,25	0,06523743	2025,11773940	243,52
8	33,25	0,07764951	2015,39956642	243,52
8	33,25	0,07803559	2044,60825579	243,52
8	33,25	0,08233002	2059,53240364	243,52
8	33,25	0,08513456	2074,67602426	243,52
10	33,25	0,15486452	2181,19182405	243,52
10	33,25	0,15648840	2197,84214332	243,52
10	33,25	0,16274615	2214,74862134	243,52
13	33,25	0,23745370	2206,12010591	243,52
13	33,25	0,23613871	2222,70747512	243,52
13	33,25	0,23494628	2239,54616812	243,52
13	33,25	0,24662971	2274,00072455	243,52
4	51,74	0,12765050	2031,05352359	836,38
4	51,74	0,12681678	2093,54747816	836,38
4	51,74	0,12870509	2109,77652838	836,38
4	51,74	0,13524254	2126,25915751	836,38
6	51,74	0,18126914	2134,28329912	836,38
6	51,74	0,18498497	2237,55507166	836,38
6	51,74	0,19624949	2255,74657630	836,38
6	51,74	0,21257481	2274,23630234	836,38
8	51,74	0,29810188	2109,42930559	836,38
8	51,74	0,29928404	2141,39035568	836,38
8	51,74	0,31553630	2174,33482269	836,38
8	51,74	0,34634717	2191,19013139	836,38
10	51,74	0,51699359	2359,03440821	836,38
10	51,74	0,52923291	2378,53056035	836,38
10	51,74	0,53497210	2398,35164835	836,38
10	51,74	0,60523917	2418,50586388	836,38
13	51,74	0,96937201	2507,56104267	836,38
13	51,74	0,97726982	2528,99318833	836,38
13	51,74	1,01916706	2550,79485375	836,38

13	51,74	1,04595824	2572,97567857	836,38
4	45,51	0,12720316	2161,94603519	772,95
4	45,51	0,13691045	2192,83097855	772,95
4	45,51	0,14836597	2208,60674098	772,95
4	45,51	0,16307680	2224,61113765	772,95
6	45,51	0,23848964	2213,53763607	772,95
6	45,51	0,25509943	2245,15960230	772,95
6	45,51	0,27420872	2261,31182966	772,95
6	45,51	0,29950527	2277,69814726	772,95
8	45,51	0,41596252	2370,37452344	772,95
8	45,51	0,42223566	2387,42757756	772,95
8	45,51	0,44826523	2404,72777740	772,95
8	45,51	0,50625022	2440,09142118	772,95
10	45,51	0,63683823	2334,86581446	772,95
10	45,51	0,81817034	2368,70444945	772,95
10	45,51	0,82451303	2385,99426295	772,95
10	45,51	0,82470328	2403,53833841	772,95
13	45,51	1,28531210	2449,38495442	772,95
13	45,51	1,28681712	2484,37616805	772,95
13	45,51	1,30071986	2520,38161976	772,95
13	45,51	1,38501142	2538,77856589	772,95
4	8,03	0,06405081	1522,65081857	118,01
4	8,03	0,06586323	1567,43466617	118,01
4	8,03	0,06624393	1590,82921343	118,01
6	8,03	0,07014870	1538,72318158	118,01
6	8,03	0,07088160	1561,02351755	118,01
6	8,03	0,07197960	1583,97974574	118,01
8	8,03	0,07211184	1613,85213426	118,01
8	8,03	0,07328758	1637,24129563	118,01
8	8,03	0,07439398	1661,31837350	118,01
10	8,03	0,08213149	1763,95368548	118,01
10	8,03	0,08363940	1789,15302385	118,01
10	8,03	0,08428129	1815,08277782	118,01
13	8,03	0,12239771	1807,43803480	118,01
13	8,03	0,12532949	1833,25857816	118,01
13	8,03	0,12835345	1859,82754306	118,01
4	50,22	0,30634033	1891,09013053	54,45
4	50,22	0,33635331	1945,90433721	52,83
4	50,22	0,36908167	1960,10801850	52,83
6	50,22	0,51210349	2036,21888316	52,83
6	50,22	0,53688510	2065,72930175	52,83
6	50,22	0,57471786	2096,10767384	52,83
8	50,22	0,63692834	2057,32812876	52,83

8	50,22	0,67799136	2114,47613233	52,83
8	50,22	0,70124179	2144,25748631	52,83
10	50,22	0,79884804	2159,93870076	52,83
10	50,22	0,85860976	2223,46630960	52,83
10	50,22	0,89551399	2256,65237392	52,83
13	50,22	1,22609487	2339,93705825	52,83
13	50,22	1,26805846	2373,36473051	52,83
13	50,22	1,32709713	2407,76132080	52,83
4	64,03	1,32446174	2511,69343477	99,83
4	64,03	1,33722887	2550,93864469	99,83
4	64,03	1,95939703	2571,02477575	99,83
4	64,03	1,37632127	2591,42973429	99,83
6	64,03	1,72810475	2559,47349354	99,83
6	64,03	1,77136295	2579,31437333	99,83
6	64,03	1,78285914	2599,46526688	99,83
6	64,03	1,80812925	2640,72662032	99,83
8	64,03	2,84433808	2648,44158817	99,83
8	64,03	2,85337152	2669,29545895	99,83
8	64,03	2,12120598	2690,48034354	99,83
8	64,03	2,16555772	2712,00418629	99,83
10	64,03	2,88610538	2697,82672684	99,83
10	64,03	2,89075283	2784,85339545	99,83
10	64,03	2,90194849	2807,49447997	99,83
10	64,03	2,91424425	2830,50672980	99,83
13	64,03	3,46011602	3112,03833760	99,83
13	64,03	3,46101544	3167,61045077	99,83
13	64,03	3,45971379	3196,14748186	99,83
13	64,03	3,45782066	3225,20336806	99,83

3 APÊNDICE C – Dados dos Experimentos para a Validação

Umidade (%)	Teor de Fe (%)	Densidade (kg.m3)	Resp. do Sensor (ganho)	Granulometria (um)
5	33,25	1927,886539	0,067193466	243,52
5	33,25	1956,660965	0,067753528	243,52
5	33,25	1971,372702	0,069908003	243,52
5	33,25	1986,307343	0,072232287	243,52
7	33,25	1928,646184	0,085769209	243,52
7	33,25	1956,597578	0,087623363	243,52
7	33,25	1970,879312	0,089984344	243,52
7	33,25	1985,371072	0,094531702	243,52
9	33,25	2022,001108	0,122088665	243,52
9	33,25	2052,180229	0,128311834	243,52
9	33,25	2067,610156	0,134375984	243,52
9	33,25	2083,273869	0,142208831	243,52
11	33,25	2180,097024	0,218639473	243,52
11	33,25	2196,612911	0,225256966	243,52
11	33,25	2213,380948	0,230391519	243,52
11	33,25	2230,406956	0,239101391	243,52
5	51,74	2329,200259	0,170335298	836,38
5	51,74	2349,107954	0,186932954	836,38
5	51,74	2369,358884	0,203654213	836,38
5	51,74	2389,962005	0,223489537	836,38
7	51,74	2332,984476	0,29658685	836,38
7	51,74	2352,589387	0,321015525	836,38
7	51,74	2372,526586	0,340761005	836,38
7	51,74	2392,804591	0,371374526	836,38
9	51,74	2228,054683	0,525620203	836,38
9	51,74	2245,598421	0,541190451	836,38
9	51,74	2263,420631	0,563594498	836,38
9	51,74	2281,527996	0,592196337	836,38
11	51,74	2381,767335	0,686078515	836,38
11	51,74	2421,463457	0,723706338	836,38
11	51,74	2441,81189	0,763096526	836,38
11	51,74	2462,505211	0,807230527	836,38
5	45,51	2225,05046	0,239053106	772,95
5	45,51	2241,058017	0,262774666	772,95
5	45,51	2257,297568	0,286860236	772,95
5	45,51	2273,774192	0,312877502	772,95
7	45,51	2338,117665	0,488774825	772,95

7	45,51	2354,938655	0,523638744	772,95
7	45,51	2372,003428	0,567257362	772,95
7	45,51	2389,317322	0,599320396	772,95
9	45,51	2474,878469	0,809710272	772,95
9	45,51	2492,943275	0,849475478	772,95
9	45,51	2511,27374	0,894368253	772,95
9	45,51	2529,875768	0,93747737	772,95
11	45,51	2605,021187	1,242418995	772,95
11	45,51	2624,756196	1,277585728	772,95
11	45,51	2644,792503	1,333585684	772,95
11	45,51	2665,137061	1,38101823	772,95
5	8,03	1659,222736	0,053769004	118,01
5	8,03	1682,925918	0,05464339	118,01
5	8,03	1695,033298	0,054665217	118,01
5	8,03	1707,316148	0,054371873	118,01
7	8,03	1732,712865	0,061465836	118,01
7	8,03	1757,824646	0,061555227	118,01
7	8,03	1770,655483	0,062139195	118,01
7	8,03	1783,675008	0,063027974	118,01
9	8,03	1806,171744	0,063822015	118,01
9	8,03	1819,355479	0,064166405	118,01
9	8,03	1832,733093	0,064820659	118,01
9	8,03	1846,308894	0,065381321	118,01
11	8,03	1874,350632	0,078784434	118,01
11	8,03	1888,032024	0,078942965	118,01
11	8,03	1901,914612	0,079571119	118,01
11	8,03	1916,002868	0,07982946	118,01
5	50,22	2053,677376	0,38926805	52,83
5	50,22	2083,015624	0,395588707	52,83
5	50,22	2098,001348	0,407808049	52,83
5	50,22	2113,204256	0,422151734	52,83
7	50,22	2130,784182	0,4831581	52,83
7	50,22	2161,665112	0,492756922	52,83
7	50,22	2177,443689	0,507891447	52,83
7	50,22	2193,454305	0,552052585	52,83
9	50,22	2116,275719	0,659546942	52,83
9	50,22	2131,722987	0,6969171	52,83
9	50,22	2147,397421	0,719668854	52,83
9	50,22	2163,304068	0,746061829	52,83
11	50,22	2276,408891	0,962586812	52,83
11	50,22	2309,885493	0,971815636	52,83
11	50,22	2326,995756	0,986992829	52,83
11	50,22	2344,361396	1,017479668	52,83

5	64,03	2595,417331	1,589363962	99,83
5	64,03	2616,015881	1,640130736	99,83
5	64,03	2636,944008	1,766933334	99,83
5	64,03	2658,209686	1,83857281	99,83
7	64,03	2666,267972	1,935957055	99,83
7	64,03	2687,598116	1,988424521	99,83
7	64,03	2709,272295	2,038063508	99,83
7	64,03	2731,298899	2,118088544	99,83
9	64,03	2749,531574	2,528870311	99,83
9	64,03	2771,88549	2,625618166	99,83
9	64,03	2794,605863	2,697975176	99,83
9	64,03	2865,058111	2,764254159	99,83
11	64,03	2845,690609	3,17678002	99,83
11	64,03	2869,208713	3,184161133	99,83
11	64,03	2893,118786	3,199427791	99,83
11	64,03	2917,430709	3,222565799	99,83