

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



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

Dissertação

## DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR CAPACITIVO, COPLANAR E NÃO-INVASIVO PARA MEDIÇÃO ON-LINE DE UMIDADE DE MINÉRIO DE FERRO EM SILOS

Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva

Ouro Preto Minas Gerais, Brasil 2019

#### Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva

## DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR CAPACITIVO, COPLANAR E NÃO-INVASIVO PARA MEDIÇÃO ON-LINE DE UMIDADE DE MINÉRIO DE FERRO EM SILOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação 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. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc.

Coorientador: Prof. Sávio Augusto Lopes da Silva, Ph.D.

Coorientador: Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro, D.Sc.

#### SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S58	<ul> <li>Silva, Marcelo Eustáquio Hamanaka .</li> <li>Desenvolvimento de um transdutor capacitivo, coplanar e não-invasivo para medição on-line de umidade de Minério de Ferro em silos. [manuscrito] / Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva 2019.</li> <li>116 f.: il.: color., gráf., tab</li> </ul>
	Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo. Coorientadores: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro, Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva. Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.
	1. Instrumentos de medição - Umidade de minério. 2. Capacitadores - Constante dielétrica. 3. Sensor capacitivo. I. Silva, Marcelo Eustáquio Hamanaka . II. Monteiro, Paulo Marcos de Barros. III. Segundo, Alan Kardek Rêgo. IV. Silva, Sávio Augusto Lopes da. V. Universidade Federal de Ouro Preto. ✔DDÚt\$84.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716

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

Desenvolvimento de um Transdutor Capacitivo, Coplanar e Não-invasivo para Medição de Umidade de Minério de Ferro On-line em Silos

Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva

Dissertação defendida e aprovada em 05 de setembro de 2019 pela banca examinadora constituída pelos professores:

D.Sc. Alan Kardek Régo Segundo Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) D.Sc. Paulo Marcos de Barros Monteiro Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) D.Sc. Sávio Augusto Lopes da Silva Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) 3000000000 TT. D.Sc. Rosa Elvira Correa Pabón Membro interno - Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI) Silvia C.M. Semeida D.Sc. Silvia Grasiella Moreira Almeida Membro externo - Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

Dedico este trabalho à comunidade científica, à minha família e à minha companheira, Bárbara.

## Agradecimentos

O ciclo da pesquisa não se conclui com o seu compartilhamento no meio científicoacadêmico: ele acaba com os agradecimentos. Depois dessa longa caminhada, gostaria de agradecer algumas pessoas e grupos, que talvez mesmo sem saber, foram vitais aos desenvolvimento da pesquisa e alcance dos resultados aqui expostos.

Agradeço, primeiramente, aos orientadores, por me aceitarem como mestrando e confiarem em mim. Em especial agradeço ao Dr. Alan Kardek pela amizade, paciência, conselhos e estímulo para conseguir concluir essa dissertação.

Aos familiares que me apoiaram durante essa caminhada, em especial à minha irmã Raíssa e meus pais Sônia e Marcio. À minha amada companheira, Bárbara, pelo apoio incondicional e compartilhamento de todos os momentos deste trabalho.

Aos irmãos de república, pelo acolhimento e incentivo. Aos irmãos de mestrado pelo conhecimento compartilhado e amizade, em especial, Leite, Dudu, Mocô, Vinicim, Marcos, Pedrão, Xandão e Gabriel. Aos bolsistas, técnicos e estagiários do LABCAM, que foram fundamentais na reta final do projeto.

À UFOP e ITV pela oportunidade, infraestrutura e corpo docente de alto nível. Ao engenheiro William Kaiser, da Vale, um mestre que aceitou ajudar um mestrando a resolver um grande desafio enfrentado por esta pesquisa, impactando positivamente este e outros projetos envolvidos no tema. Aos amigos que fiz no projeto da UPGN-Comperj que auxiliaram no meu crescimento profissional na área de instrumentação industrial, em especial Cipriano, Philippe, Antônio e Leda. Aos colegas de trabalho da Chemtech, que se preocuparam e auxiliaram este trabalho ser finalizado, em particular ao Sartini.

À todos esses memoráveis indivíduos, o meu mais sincero afeto e gratidão pelo tempo de vida compartilhado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

"A única herança real é o conhecimento." (Carlos Bernardo González Pecotche)

#### Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

#### DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR CAPACITIVO, COPLANAR E NÃO-INVASIVO PARA MEDIÇÃO ON-LINE DE UMIDADE DE MINÉRIO DE FERRO EM SILOS

Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva

Setembro/2019

Orientadores: Alan Kardek Rêgo Segundo Sávio Augusto Lopes da Silva Paulo Marcos de Barros Monteiro

A umidade presente no minério de ferro, quando em excesso, pode afetar o processo de beneficiamento, causar perdas de produtividade e onerar o custo de transporte. O método mais difundido atualmente entre as mineradoras, para medir a umidade nas diferentes etapas do beneficiamento e manuseio do minério, envolve a pesagem e secagem das amostras extraídas do processo. Esse processo convencional de medição é lento e pode demorar até 24 horas para fornecer o resultado. Consequentemente, o lote referente à amostra de minério sob análise pode se encontrar a vários quilômetros de distância no momento do resultado, fazendo com que as medidas corretivas relacionadas àquele lote de produto em tráfego sejam ineficientes. As tecnologias disponíveis no mercado para monitoramento de umidade durante o beneficiamento do minério não apresentam um alto desempenho quantitativo, o que inviabiliza a implementação em ambiente industrial. Visando solucionar esses problemas, neste projeto, foi desenvolvido um transdutor capacitivo, coplanar, sem contato e de baixo custo para medição on-line de umidade de minério de ferro em silos. O princípio de funcionamento do transdutor é baseado na variação da capacitância do elemento sensor, que é diretamente proporcional à variação da umidade do minério. Além disso, o transdutor possui: (i) um circuito oscilador, que transforma a variação de capacitância em um sinal de tensão com frequência variável; e (ii) um microcontrolador, que realiza a medição da frequência desse sinal e transmite, via radiofrequência, os dados para um computador. Os resultados obtidos com o procedimento calibração, para duas montagens construídas com características geométricas diferentes, alcançaram um coeficiente de determinação de 94,17% e de 98,41%. Foi realizada uma validação cruzada k-fold sobre a massa de dados obtida no procedimento de calibração, e estabeleceu-se um coeficiente de determinação nesse experimento de 92,14% e 98,27%, respectivamente. Um teste simulando condições reais de funcionamento em um silo em miniatura foi realizado e a curva de erros do sistema foi obtida, viabilizando a implementação do transdutor desenvolvidos em silos que operam em batelada. Adicionalmente, são apresentados os resultados sobre as preparações das amostras minerais úmidas de todos os experimentos e as conclusões sobre a metodologia adotada relacionado à compactação e interferências eletromagnéticas envolvidas.

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

Macrotema: Usina; Linha de Pesquisa: Instrumentação no Processamento de Minérios; Tema: Medição on-line de umidade do minério de ferro;

#### Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

#### DEVELOPMENT OF A CAPACITIVE, NON-INVASIVE, COPLANAR TRANSDUCER FOR ONLINE MEASUREMENT OF IRON ORE MOISTURE IN SILOS

Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva

September/2019

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

Moisture in iron ore, when in excess, can affect the beneficiation process, cause productivity losses and overtax the transportation cost. The most widespread method currently used by mining companies to measure moisture at the different stages of ore processing and handling involves weighing and drying the samples extracted from the process. This conventional measurement process is slow and can take up to 24 hours to provide the result. Consequently, the batch for the ore sample under analysis may be several kilometers apart at the time of the result, making corrective measures related to that batch of product in transit inefficient. The technologies available in the market for monitoring humidity during ore beneficiation do not present a high quantitative performance, which makes the implementation in industrial environment unfeasible. In order to solve these problems, in this project, a low-cost, non-contact capacitive, coplanar transducer was developed for online measurement of iron ore moisture in silos. The operating principle of the transducer is based on the sensor element capacitance variation, which is directly proportional to the ore moisture variation. In addition, the transducer has: (i) an oscillator circuit, which transforms the capacitance change into a variable frequency voltage signal; and (ii) a microcontroller, which measures that signal frequency and transmits the data to a computer via radio frequency. The results obtained with the calibration procedure, for two different assemblies built, reached a determination coefficient of 94.17% and 98.41%. A k-fold cross-validation was performed on the data mass obtained in the calibration procedure, and a determination coefficient of 84.99 % and 95.98 %, respectively, was established in this experiment. A test simulating actual operating conditions in a miniature silo was performed and the system error curve was obtained. Additionally, the results of the preparation of the wet mineral samples for all the experiments and the conclusions about the adopted methodology are presented.

Keywords: ore moisture measurement, dielectric constant, capacitive sensor.

**Macrotheme:** Plant; **Research Line:** Instrumentation in Mineral Processing; **Theme:** Online iron ore moisture measurement;

# Lista de Figuras

Figura 2.1	Campo $\vec{E}$ originado no ponto P e produzido por um objeto carregado	22
Figura 2.2	(a) Placas paralelas carregadas; (b) capacitor ideal sem os efeitos de bordas;	
(c) dei	monstração dos efeitos de borda.	23
Figura 2.3	Placas condutoras carregadas: (a) com excesso de cargas positivas; (b) com	
excess	o de cargas negativas; (c) com excesso de cargas opostas colocadas lado a lado.	23
Figura 2.4	Representação esquemática da construção típica de um capacitor de placas	
parale	las	24
Figura 2.5	Mapa conformal de uma estrutura coplanar.	26
Figura 2.6	Consideração para a transformação conformal no plano W	27
Figura 2.7	Região de sensoriamento de um sensor capacitivo coplanar. (a) Distribuição	
de linh	nas equipotenciais obtidas por FEM e (b) linhas de campo elétrico.	29
Figura 2.8	Linhas de campo elétrico entre <i>ch</i> e <i>gnd</i>	30
Figura 2.9	Comparação de transmissão de sinal analógico com e sem shield	31
Figura 2.10	Modelo elétrico convencional que contempla a interferência externa (mão	
humar	na).	31
Figura 2.11	Representação de imperfeições características de partículas sólidas	32
Figura 2.12	Diferenças da umidade em partículas sólidas.	33
Figura 2.13	Diagrama de blocos genérico do processo de amostragem em tratamento de	
minéri	ios	34
Figura 2.14	Instrumento quarteador de cruzeta.	37
Figura 3.1	Representação elétrica do método ressonante: (a) Circuito típico de medição	
por res	ssonância e (b) circuito ressonante com imunização e detector de corrente	38
Figura 3.2	Circuito de carga e descarga capacitivos aplicado à transdutores.	39
Figura 3.3	Método de ponte CA: (a) Circuito de ponte CA básica e de (b) ponte eletrônica.	40
Figura 3.4	Típico transdutor capacitivo de ponte CA.	40
Figura 3.5	Abordagens típicas do método oscilador.	41
Figura 3.6	Interior do CI Temporizador 555 (a). Circuito oscilador em configuração	
astáve	1 (b).	43
Figura 3.7	Representação do sensor capacitivo de nível e da interface com o motorista.	44

Figura 3.8	Representação real e esquemática do sensor capacitivo de nível não invasivo,	
sem ne	ecessidade de calibração.	44
Figura 3.9	Diagrama esquemático e elétrico do sistema de medição de nível baseado	
no mét	todo oscilador.	45
Figura 3.10	Digrama de blocos completo do sistema de análise de fluidos bifásicos, evi-	
dencia	ndo abordagem do elemento sensor.	45
Figura 3.11	PCI da sonda experimental do sistema de medição de umidade	46
Figura 3.12	Sistema de medição de umidade baseada em micro-ondas apresentada pela	
Amira	International - "Unidade TBM"(a). Desenho esquemático de arquitetura	
típica o	de analisadores de umidade on-line baseados em micro-ondas para aplicações	
em cor	reias transportadoras (b).	47
Figura 3.13	Arranjo e conexões dos instrumentos supracitados para medição de umidade	
on-line	e de sólidos.	48
Figura 4.1	Fluxograma do processo de extração de minério de ferro da Serra dos Carajás.	49
Figura 4.2	Alimentação dos vagões ferroviários por silos de estocagem de minério de	
ferro e	m Carajás-PA.	50
Figura 4.3	Monitoramento da umidade na usina Conceição I da Vale Itabira-MG. A	
ação d	e intervenção da equipe está representada entre Dez/2016 e Abr/17.	51
Figura 5.1	Diagrama de Pinos.	53
Figura 5.2	Módulo de comunicação Xbee <i>wireless</i> .	54
Figura 5.3	Miniatura de silo e leito de madeira para teste em laboratório.	55
Figura 5.4	Simulação de todas as funcionalidades projetadas para o sistema.	58
Figura 5.5	Seleção de componentes para confecção de Placa de Circuito Impresso	60
Figura 5.6	Visualização da PCI desenvolvida no Proteus.	61
Figura 5.7	Representação da PCI do sistema, antes e depois do acabamento final. Em	
(a) obs	erva-se o sistema construído real e em (b) o encapsulamento final idealizado	
para a	implantação das funcionalidades projetadas.	61
Figura 5.8	Estratégia de construção do design dos transdutores	62
Figura 5.9	Representação das dimensões físicas e de arranjo dos eletrodos da montagem 2.	63
Figura 5.10	Acoplamento, por pressão, dos eletrodos utilizados na montagem 2 na PCI	
constru	uída	64
Figura 5.11	Camadas das montagens de transdutores capacitivos coplanares. Está repre-	
sentada	a em (a) a Montagem 1 e em (b) a Montagem 2.	65
Figura 5.12	Indicação da camada de PEAD para nivelamento dos eletrodos feitos de	
chapas	de cobre.	66
Figura 5.13	Consolidação do circuito equivalente dos transdutores construídos para mo-	
nitorar	nento de ar ou água.	66

Figura 5.14 Fluxograma de execução do protocolo de comunicação criado entre os ele-	
mentos de hardware e software.	68
Figura 5.15 Secagem das amostras de minério de ferro: (a) tambor metálico com lacre	
para transporte das amostras até a UFOP; (b) secagem a céu aberto em lonas plásticas.	69
Figura 5.16 Procedimento de homogenização em lona Sider.	70
Figura 5.17 Etapas para a construção da pilha cônica, que antecede o quarteamento: (1),	
(2), (3) e (4) demonstram a ordem de uma rodada de manipulação da lona	71
Figura 5.18 Etapas para quarteamento da pilha cônica até a redução almejada de quanti-	
dade de material.	71
Figura 5.19 Caixa de PEAD para ensaios estáticos.	72
Figura 5.20 Sequências de operações de homogenização das amostras utilizadas para	
calibração:(a) separação sublote mineral; (b)inserção de água destilada; (c) absorção	
imediata da água pela amostra; (d) soterramento da água com minério seco; (e)	
repartição do sublote úmido em blocos menores; (f) repartição manual máxima em	
cada sublote mineral úmido; (g), (h), (i) e (j) homogenização secundária da amostra	
no saco plástico.	73
Figura 5.21 Aplicação de incrementos de água durante homogenização das amostras do	
Experimento IV.	75
Figura 5.22 Representação esquemática da elaboração de cada amostra destinada ao Ex-	
perimento IV.	76
Figura 5.23 Face sensora da montagem 2, sem revestimento de PEAD	77
Figura 5.24 (a) e (b) representam a medição com LCR nas duas montagens construídas	
e em (c) e (d) pode-se observar como foram inseridas as inserções dos lotes de água	
destilada.	78
Figura 5.25 Alíquotas de verificação retiradas dos lotes amostrais de pellet feed utiliza-	
dos para calibrar as montagens.	79
Figura 5.26 Execução do procedimento experimental IV. Em (a) observa-se os compo-	
nentes de teste para realização do experimento; (b) a visão frontal do arranjo expe-	
rimental; (c) foca o detalhe de instalação da Montagem 2 do transdutor no equipa-	
mento; e (d) a execução do teste.	80
Figura 6.1 Relação entre umidade desejada e umidade real das amostras de concentrado	
usadas durante a calibração do transdutor.	83
Figura 6.2 Relação entre umidade requerida e umidade alcançada, nas amostras de con-	
centrado para teste do transdutor no silo.	84
Figura 6.3 Valores de capacitância da montagem 1: sem (a) e com (b) revestimento de	
PEAD na face sensora, medidos a 100kHz e 200kHz.	86
Figura 6.4 Valores de capacitância das montagem 2: sem (a) e com (b) revestimento de	
PEAD na face sensora, medidos a 100 kHz e 200 kHz.	88

Figura 6.5	Comportamento dos valores médios de capacitância da montagem 1: Em	
(a), val	lores aferidos com LCR e em (b), valores indicados pelo transdutor capacitivo.	89
Figura 6.6	Comportamento dos valores de capacitância da montagem 2: Em (a), valores	
aferido	os com LCR e em (b), valores produzidos pelo transdutor capacitivo	91
Figura 6.7	Comparação dos resultados de calibração da montagem 1. (a) apresenta as	
mediçã	ões do LCR à 100 kHz, (b) são as medições do LCR à 200 kHz e (c) são as	
mediçã	ões do sistema desenvolvido.	93
Figura 6.8	Comparação dos resultados de calibração da montagem 2. (a) apresenta as	
mediçã	ões do LCR à 100 kHz, (b) são as medições do LCR à 200 kHz e (c) são as	
mediçã	ões do sistema desenvolvido.	95
Figura 6.9	Relação de umidades aferidas e reais, utilizando a metodologia k-fold. Em	
(a) obs	erva-se a validação para a Montagem 1 e em (b) observa-se a validação para	
a Mon	tagem 2	96
Figura 6.10	Resultados gráficos de medição no silo - Experimento IV: (a) curva de erros;	
(b) Co	njunto de pontos das medições efetuadas.	98
Figura 6.11	Representação das hipóteses apontadas pela análise crítica do Experimento	
IV: (a)	homogeneização; (b) ruídos; (c) velocidade de escoamento; (d) compactação. 1	00
Figura 7.1	Rede de transdutores capacitivos sem fio para monitoramento de silos 1	03
Figura 2	Resultados laboratorias das análises físico químicas do concentrado e rejeito	
da flota	ação	09
Figura 3	Exemplar de equipamento de fluorescência em Raio-X, tubo com anodo de	
ródio c	le 4 Kw	10
Figura 4	Granulômetro e Picnômetro, respectivamente	11

## Lista de Tabelas

Tabela 5.1	Propriedades físicas e elétricas do PEAD	56
Tabela 5.2	Capacitâncias para o arranjo capacitivo coplanar construído com espessura	
despre	ezível	67
Tabela 6.1	Comparação entre a umidade desejada $(U_d)$ e a umidade real $(U_{real})$ .	83
Tabela 6.2	Características de massa de sólidos, massa de água das alíquotas e cápsulas	
de ver	ificação	84
Tabela 6.3	Influência do revestimento de PEAD na face sensora para a montagem 1	87
Tabela 6.4	Influência do revestimento de PEAD na face sensora para a montagem 2	88
Tabela 6.5	Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor	
capac	itivo da montagem 1	90
Tabela 6.6	Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor	
capac	itivo da montagem 2	92
Tabela 6.7	Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor	
capac	itivo da montagem 1	94
Tabela 6.8	Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor	
capac	itivo da montagem 2	94
Tabela 6.9	Teste no silo - Montagem 2	98
Tabela 1	Validação cruzada k-fold - Montagem 1	112
Tabela 2	Validação cruzada k-fold - Montagem 2	115

## Sumário

I.I. Objetivos       18         I.I.I. Objetivo geral       18         I.I.I. Objetivo sepecíficos       19         I.2. Escopo e limitações       19         I.3. Organização do texto       20 <b>2 Fundamentação Teórica</b> 21         2.1. Conceitos de capacitores       21         2.1.1. Campo elétrico       21         2.1.2. Capacitância       23         2.1.3. Capacitôres coplanares       25         2.1.4. Shield       30         2.2. Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3. Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1. Amostragem em lotes manuscáveis       35         2.3.2. Homogenização e quarteamento       36         2.3.3. Método padrão de estufa       38         3.1. Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2. Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3. Equipamentos de monitoramento de umidade       40         4.1. Carajás-PA       49         4.2. Itabira-MG       50	1	Introdução	17
I.I.I. Objetivo geral18I.I.2 Objetivos específicos19I.2 Escopo e limitações19I.3 Organização do texto202 Fundamentação Teórica212.1 Conceitos de capacitores212.1.2 Capacitância232.1.3 Capacitores coplanares252.1.4 Shield302.2 Comportamento da umidade em partículas sólidas322.3 Amostragem et tratamento de minério332.3.1 Amostragem em lotes manuseáveis352.3.2 Homogenização e quarteamento362.3.3 Método padrão de estufa373 Revisão Bibliográfica383.1 Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria383.2 Sensores e Transdutores Capacitivos433.3 Equipamentos de monitoramento de umidade464 Estudos de caso494.1 Carajás-PA494.2 Itabira-MC505 Materiais e Métodos525 1 Desenvolvimento do protótino52		1.1 Objetivos	18
I.1.2       Objetivos específicos       19         I.2       Escopo e limitações       19         I.3       Organização do texto       20         2       Fundamentação Teórica       21         2.1       Conceitos de capacitores       21         2.1.2       Capacitáncia       23         2.1.3       Capacitónes coplanares       25         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       36         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       40         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50		1.1.1 Objetivo geral	18
1.2       Escopo e limitações       19         1.3       Organização do texto       20         2       Fundamentação Teórica       21         2.1       Conceitos de capacitores       21         2.1.1       Campo elétrico       21         2.1.2       Capacitância       23         2.1.3       Capacitônes coplanares       25         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuscáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50		1.1.2 Objetivos específicos	19
1.3       Organização do texto       20         2       Fundamentação Teórica       21         2.1       Conceitos de capacitores       21         2.1.1       Campo elétrico       21         2.1.2       Capacitância       23         2.1.3       Capacitância       23         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem et tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuscáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos]       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MGi       50		1.2 Escopo e limitações	19
2       Fundamentação Teórica       21         2.1       Conceitos de capacitores       21         2.1.1       Campo elétrico       21         2.1.2       Capacitância       23         2.1.3       Capacitores coplanares       25         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótino       52		1.3 Organização do texto	20
2       Fundamentação Teórica       21         2.1       Conceitos de capacitores       21         2.1.1       Campo elétrico       21         2.1.2       Capacitância       23         2.1.3       Capacitôncia       23         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       40         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótino       52			
2.1       Conceitos de capacitores       21         2.1.1       Campo elétrico       21         2.1.2       Capacitância       23         2.1.3       Capacitores coplanares       25         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótino       52	2	Fundamentação Teórica	21
2.1.1       Campo elétrico       21         2.1.2       Capacitância       23         2.1.3       Capacitores coplanares       25         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52		2.1 Conceitos de capacitores	21
2.1.2       Capacitância       23         2.1.3       Capacitores coplanares       25         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MC       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótino       52		2.1.1 Campo elétrico	21
2.1.3       Capacitores coplanares       25         2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52		2.1.2 Capacitância	23
2.1.4       Shield       30         2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52		2.1.3 Capacitores coplanares	25
2.2       Comportamento da umidade em partículas sólidas       32         2.3       Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52		2.1.4 Shield	30
2.3 Amostragem e tratamento de minério       33         2.3.1 Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2 Homogenização e quarteamento       36         2.3.3 Método padrão de estufa       37         3 Revisão Bibliográfica       38         3.1 Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2 Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3 Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4 Estudos de caso       49         4.1 Carajás-PA       49         4.2 Itabira-MG       50         5 Materiais e Métodos       52         5 1 Desenvolvimento do protótipo       52		2.2 Comportamento da umidade em partículas sólidas	32
2.3.1       Amostragem em lotes manuseáveis       35         2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótino       52		2.3 Amostragem e tratamento de minério	33
2.3.2       Homogenização e quarteamento       36         2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótino       52		2.3.1 Amostragem em lotes manuseáveis	35
2.3.3       Método padrão de estufa       37         3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52		2.3.2 Homogenização e quarteamento	36
3       Revisão Bibliográfica       38         3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52		2.3.3 Método padrão de estufa	37
3 Revisão Bibliográfica       38         3.1 Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2 Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3 Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4 Estudos de caso       49         4.1 Carajás-PA       49         4.2 Itabira-MG       50         5 Materiais e Métodos       52         5 1 Desenvolvimento do protótino       52			
3.1       Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria       38         3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52	3	Revisão Bibliográfica	38
3.2       Sensores e Transdutores Capacitivos       43         3.3       Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52		3.1 Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria	38
3.3 Equipamentos de monitoramento de umidade       46         4 Estudos de caso       49         4.1 Carajás-PA       49         4.2 Itabira-MG       50         5 Materiais e Métodos       52         5.1 Desenvolvimento do protótipo       52		3.2 Sensores e Transdutores Capacitivos	43
4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52		3.3 Equipamentos de monitoramento de umidade	46
4       Estudos de caso       49         4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52			40
4.1       Carajás-PA       49         4.2       Itabira-MG       50         5       Materiais e Métodos       52         5.1       Desenvolvimento do protótipo       52	4	Estudos de caso	49
4.2 Itabira-MG       50         5 Materiais e Métodos       52         5 1 Desenvolvimento do protótipo       52		4.1 Carajás-PA	49
5Materiais e Métodos525.1Desenvolvimento do protótipo52		4.2 Itabira-MG	50
51     Desenvolvimento do protótipo     52	5	Materiais e Métodos	52
1 $1 $ $1 $ $1 $ $1 $ $1 $ $1 $ $1$	J	5.1 Desenvolvimento do protótino	52
5.1 Materiais		5.1 Desenvolvimento do prototipo	52 52

	5.1.2 Simulação	. 56	, )
	5.1.3 Placa de Circuito Impresso	. 59	)
	5.1.4 Sensor capacitivo coplanar	. 62	)
	5.1.5 Protocolo de Comunicação <i>wireless</i>	. 67	1
5.2	Preparação do minério	. 68	))
	5.2.1 Secagem da polpa	. 68	))
	5.2.2 Amostragem	. 69	)
	5.2.3 Preparação das amostras minerais úmidas	. 72	)
5.3	Experimentos	. 76	)
	5.3.1 Experimento I	. 77	1
	5.3.2 Experimento II	. 77	1
	5.3.3 Experimento III	. 78	))
	5.3.4 Experimento IV	. 79	)
		04	
6 Res	ultados e Discussoes	82	2
6.1	Amostras para uso na calibração estática	. 82	-
6.2	Amostras para teste no silo	. 83	,
6.3	Experimentos	. 85	í
	6.3.1 Experimento I — Capacitância fixa do sensor	. 85	í
	6.3.2 Experimento II — Comportamento com água destilada e ar	. 89	)
	6.3.3 Experimento III — Calibração e validação estática	. 92	2
	6.3.4 Experimento IV — Teste no silo	. 96	)
		101	
7 Con	clusao	101	-
7.1		100	,
	Recomendações de trabalhos futuros	. 102	
Referên	cias Bibliográficas	. 102 <b>10</b> 4	ļ

## 1. Introdução

O processo de beneficiamento de minério de ferro atualmente é feito a úmido, com a ressalva de algumas usinas de beneficiamento mineral que estão migrando suas operações unitárias de tratamento de minério de ferro para umidade natural. A umidade é uma grandeza que influencia diretamente o custo do produto final dessa cadeia produtiva, principalmente no que tange à segurança, ao transporte, à controlabilidade e à eficiência do beneficiamento. Os problemas envolvidos no transporte traduzem-se no aumento do risco de naufrágios de navios graneleiros quando excedido o limite de umidade transportável permitido; na falta de controlabilidade devido ao monitoramento ineficiente da umidade no processo, o que diminui a eficiência dos subprocessos de desaguamento; e no aumento de custo ao se processar grandes quantidades de material com umidade em excesso, o que impacta diretamente a produção e o próprio transporte.

Um monitoramento e controle eficientes da umidade auxiliam a reduzir o custo de produção, pois possibilitam a manipulação de variáveis de subprocessos à montante do carregamento de minério de ferro, diminuindo sua ineficiência. Alguns processos de desaguamento, que antecedem o despache do produto beneficiado, podem ser otimizados e melhorados por monitoramentos dessa espécie (SOARES *et al.*, 2017). A controlabilidade, portanto, da umidade do produto mineral despachado agrega um fator de controle maior aos subprocessos que influenciam diretamente essa variável.

Segundo Chaves (2015), a umidade é muito difícil de ser medida diretamente. Frequentemente, a determinação da umidade é inferida por meio da análise da temperatura e umidade dos gases de exaustão do processo, combinados com as devidas aplicações de balanço de calor e massa. Porém, a medição indireta não consegue estabelecer uma correlação alta entre a umidade e temperatura do produto, resultando em um controle ineficiente de subprocessos que dependem dessas variáveis (secagem, por exemplo).

O método de medição de umidade se baseia na utilização de estufas, garantindo a padronização dos resultados obtidos nos diversos laboratórios brasileiros em que é executado (DE MOURA, 2012). Para isso, são necessárias duas medições do peso das amostras com uma balança de precisão, antes e depois de serem aquecidas. Dessa forma, toda a umidade presente é evaporada via aquecimento elétrico e a umidade de cada amostra é, então, determinada. O tempo de execução pode variar em algumas horas, dependendo do tamanho da amostra analisada, chegando a casos de mais de 24 horas para a finalização completa do procedimento.

Equipamentos disponíveis no mercado podem vir a atender essa demanda de monitoramento de umidade no minério de ferro de forma qualitativa, contudo, a barreira financeira da importação desses equipamentos confirma-se bem elevada. De acordo com Ferreira (2001), dependendo do tipo de material construtivo, equipamentos aplicados à mineração são tributados em 30% ou mais, incluso o caso de equipamentos para momitoramento de umidade. Analisadores de umidade baseados em alta frequência de micro-ondas são empregados para essa finalidade, mas oneram o custo do sistema de medição pela eletrônica requisitada e necessidade de mão de obra especializada para manutenções no ambiente industrial (LENOX, 2018; VIANA, 2013).

O desenvolvimento tecnológico atualmente também envolve uma questão de competitividade entre as empresas, visto que houve uma notável elevação nos padrões de eficiência e qualidade dos concorrentes estrangeiros, que constantemente adotam práticas produtivas cada vez mais modernas. O extrativismo mineral autônomo vem sendo implantado em larga escala com sucesso no oriente, e a velocidade de transformação dessa atividade aumenta a cada dia, assim como a corrida tecnológica como fator de aceleração dessa transformação. Esse desenvolvimento geralmente é concebido em centros e institutos de pesquisa e universidades (FER-REIRA, 2001). Mais do que o desenvolvimento em si, o ideal é a combinação do avanço tecnológico sempre atrelado ao baixo custo. Lage (2018) apresenta uma solução de excelente custo-benefício, com altos índices metrológicos para medição de umidade de minério de ferro em bancada. O sistema utilizou do princípio de medição capacitivo para monitoramento da umidade por monitoramento da variação da constante dielétrica do material sob teste, analisando a umidade perante a resposta do sensor, além do teor de ferro das amostras e seu nível de compactação.

As principais diferenças desta pesquisa em relação aos outros trabalhos da área e equipamentos comerciais existentes consiste: (i) na construção embutida de todos os elementos do sistema de medição em único hardware compacto; (ii) na disposição dos eletrodos de forma coplanar que auxilia no acoplamento do sistema em aplicações de monitoramento de escoamento de minério; e (iii) no método de medição por circuito oscilador, aplicado a monitoramento de umidade em minério de ferro, que agrega uma alta relação de custo-benefício comparado à outras técnicas, como as que utilizam alta frequência.

Busca-se com este trabalho sanar a carência de método on-line e confiável para medição de umidade do minério de ferro, que configure uma solução qualitativa e quantitativamente representativa. Contribuir para solucionar essa deficiência conduziria à otimização dos processos de desaguamento, aumento da eficiência de transporte, minimização do custo associado à secagem e, indiretamente, redução do custo de produção.

## 1.1. Objetivos

Esta seção descreve o objetivo geral deste trabalho e os objetivos específicos até a validação final do equipamento desenvolvido.

#### **1.1.1.** Objetivo geral

Neste trabalho, busca-se desenvolver um transdutor capacitivo não-invasivo e coplanar, para determinação online de umidade no minério de ferro em silos.

#### 1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Estudar a influência geométrica e posicionamento relativo das placas de um capacitor com relação ao campo elétrico produzido;
- Estudar os métodos capacitivos de medição de variáveis de processos industriais, com base em propriedades dielétricas;
- Selecionar e simular de componentes eletrônicos em ambiente virtual;
- Construir a placa de circuito impresso, considerando o arranjo de dois eletrodos coplanares, elementos de conversão, processamento e envio *wireless* de dados, combinados em um único hardware;
- Implementar de firmaware com um protocolo wireless de comunicação mestre/escravo;
- Calibrar do sensor desenvolvido com base no método padrão de estufa.

## 1.2. Escopo e limitações

O escopo desta pesquisa limitou-se ao desenvolvimento e validação em laboratório de um transdutor capacitivo para medição de umidade on-line de minério de ferro em silos. Portanto, não foi construído um encapsulamento industrial para testes em plantas de beneficiamento de minério de ferro.

A pesquisa teve algumas limitações, conforme descrito a seguir:

- As amostras de minério de ferro foram obtidas em grandes quantidades, visando o teste dinâmico do protótipo, se restringiram a um tipo de minério de ferro: *pallet feed standard*, sendo o único produto comercial do portifólio da mina apoiadora da pesquisa, além de pelotas da mesma categoria.
- Para a preparação das amostras de calibração estática, o ambiente controlado do laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto foi utilizado, que conta com um sistema de climatização composto por desumidificador e ar condicionado. Para as demais preparações, não foi possível a utilização do desumidificador por problemas de manutenção corretiva que se fizeram necessárias no equipamento. Todos os outros testes a partir desse ponto, exceto a preparação das amostras de calibração, foram executados nas dependências do Laboratório Multiusuário de Controle e Automação (LABCAM) da UFOP, à temperatura ambiente.

## 1.3. Organização do texto

O texto desta dissertação está organizado em seis capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica dos conceitos físicos de capacitância e da interação da água com partículas sólidas. No Capítulo 3 é apresentado uma revisão bibliográfica dos métodos de medição de baixos valores de capacitância e alguns exemplos de equipamentos. No Capítulo 4 são apresentados estudos de caso em que a medição de umidade em empresas mineradoras foi empregada ou que a oportunidade de sua implantação foi observada. No Capítulo 5 é descrito o protótipo do instrumento desenvolvido, bem como a metodologia empregada para execução dos procedimentos práticos que envolvem a medição de umidade em silos de minério de ferro. No Capítulo 6 são apresentados os resultados dos experimentos executados pelo protótipo e discussões acerca do que foi obtido. Por fim, no Capítulo 7 estão apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

### 2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentado o princípio físico de capacitância, bem como a interação entre as partículas sólidas de materiais granulados com a água e conceitos de amostragem e tratamento de minério pertinentes ao escopo da pesquisa.

### 2.1. Conceitos de capacitores

#### 2.1.1. Campo elétrico

Segundo Halliday *et al.* (2012) e Boylestad (2012), o campo elétrico é uma grandeza vetorial usada para definir o módulo da força elétrica exercida por cada unidade de carga, por meio da distribuição de vetores dentro de uma região limitada. Pode ser representado por linhas de campo, que indicam sua intensidade em torno de um corpo carregado.

A ideia das linhas de campo elétrico surgiram com a lei de Gauss, em 1813, sendo continuada pelo físico britânico Michael Faraday. Apesar de não serem palpáveis, são até hoje a melhor alternativa de representação dos campos elétricos. A densidade dessas linhas de campo determinam a intensidade do campo elétrico. Quanto maior a carga Q, dada em Coulombs [C], maior será a quantidade de linhas de campo que atravessam uma unidade de área.

A lei de Coulomb que determina força de interação eletrostática entre duas cargas elétricas, portanto, quantifica a força exercida de uma carga sobre outra carga Q unitária, situada a uma determinada distância, conforme Equação 2.1, dada por

$$|F| = k_e \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2} = k_e \frac{|Q_1 (1C)|}{r^2} = k_e \frac{|Q_1|}{r^2},$$
(2.1)

em que  $k_e$  é a constante eletrostática que equivale a 9 \* 10<sup>9</sup> [ $Nm^2/C^2$ ],  $Q_1$  é a carga do campo elétrico [C], F é a força eletrostática entre as cargas supracitadas [N] e r é a distância [m] entre elas. Quanto maior a carga, maior será a intensidade do campo produzido sobre cargas unitárias vizinhas. A distância entre cargas elétricas influencia ao inverso a intensidade dessa força, de atração ou repulsão. Como premissa às linhas de campo elétrico originadas por essas interações, sabe-se, por convenção, que sempre se direcionarão de um corpo com carga positiva para outro corpo com carga negativa, nunca interceptando-se; e começam ou terminam sempre perpendicular às superfícies carregadas envolvidas, estabelecendo o padrão mais direto possível entre as cargas opostas. O desfecho dessas premissas gera uma pressão natural para a minimização da distância entre as cargas. Se as cargas são iguais, o efeito é igual e oposto (BOYLESTAD, 2012).

Para determinação do campo elétrico produzido por um objeto, mede-se a força eletrostática que atua sobre uma carga  $q_0$  situada a um determinado ponto P no espaço, resultando na Equação 2.2, dada por

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},\tag{2.2}$$

em que  $\vec{E}$  é dado em [N/C]. A orientação vetorial resultante do campo elétrico calculado tem a orientação da força eletrostática que o produziu. A Equação 2.2 representa o campo elétrico cuja origem está no ponto P, conforme ilustrado na Figura 2.1. Analogamente, a determinação de um campo elétrico em uma região no espaço se dá pela determinação dos campos produzidos pontualmente dentro dessa região (HALLIDAY *et al.*, 2012).



Figura 2.1: Campo  $\vec{E}$  originado no ponto P e produzido por um objeto carregado. Fonte: adaptado de Halliday *et al.* (2012)

O número de linhas de campo elétrico, se medido em um plano perpendicular a elas, equivale a um valor proporcional ao módulo de  $\vec{E}$ . Portanto, a densidade de linhas de uma região no espaço interfere nos valores de  $\vec{E}$ . Assumindo-se uma superfície plana infinita carregada positivamente e considerando-se todos os vetores campo elétricos com mesmo módulo e mesma orientação em todos os pontos do espaço, configura-se um campo elétrico uniforme. Saindo do cenário físico ideal, considerando-se uma placa finita carregada eletricamente, quanto mais longe das bordas e próximo do centro, mais uniforme as linhas de campo elétrico estarão, isso porque o chamado efeito de borda não permite a utilização da simetria planar para expressar matematicamente os campos elétricos. Esse efeito faz com que as linhas de campo perto das bordas sejam curvas e irregulares, dificultando a determinação de uma solução analítica, assim como representado na Figura 2.2] em que as cargas de cada placa equivalem a +q e -q, a distância entre placas é dados por d e a diferença de potencial elétrico entre elas é dado por V (HALLIDAY *et al.*] (2012).

A ideia das linhas de campo, portanto, faz-se extremamente eficiente para representar a configuração de campos elétricos reais em uma região do espaço. Analogamente, de acordo com Boylestad (2012), esse tipo de análise pode ser aplicada a qualquer tipo de superfície condutora carregada. Segundo Halliday *et al.* (2012), o cálculo do efeito produzido pelo acúmulo contínuo de cargas pontuais pode ser feito por métodos interativos de soma das cargas individuais. A carga por unidade de comprimento, no SI é representada por  $\lambda$  em [C/m] e a carga



Figura 2.2: (a) Placas paralelas carregadas; (b) capacitor ideal sem os efeitos de bordas; (c) demonstração dos efeitos de borda.

Fonte: adaptado de Halliday et al. (2012)

por unidade de área, por sua vez, é representada por  $\sigma$  em  $[C/m^2]$ . Na análise de placas como superfícies carregadas, portanto, uma distribuição uniforme de cargas  $\sigma_n$  pode ser adotada, exceto nas regiões de borda, onde as linhas de campo elétrico vão se orientar saindo da superfície carregada se a carga em excesso for positiva, e entrando na superfície, se for negativa. Na Figura 2.3 é demonstrado ambas situações de cargas positivas e negativas em excesso em uma superfície e sua orientação.



Figura 2.3: Placas condutoras carregadas: (a) com excesso de cargas positivas; (b) com excesso de cargas negativas; (c) com excesso de cargas opostas colocadas lado a lado. Fonte: adaptado de Halliday *et al.* (2012)

#### 2.1.2. Capacitância

A capacitância é a grandeza que mensura a capacidade de armazenar cargas elétricas dispostas nos elementos condutores, separadas por um meio dielétrico, quando submetidos a uma diferença de potencial elétrico. Um material dielétrico, por sua vez, significa que possui uma característica isolante, antagônica às características de condutividade dos materiais carregados eletricamente que o cercam. As cargas das superfícies dos materiais carregados eletricamente, nas faces mais próximas entre si, resultam no aparecimento de um campo elétrico no interior do material dielétrico. Quanto maior o aumento efetivo de cargas elétricas em excesso, maior o aumento do valor de capacitância desse sistema. Segundo Boylestad (2012), a equação que correlaciona a quantidade de carga com a capacitância está descrita na Equação 2.3, dada por

$$C = \frac{Q}{V},\tag{2.3}$$

em que C é a capacitância dada em farad [F] e V é a tensão aplicada aos materiais carregados, dada em volt [V].

Esse dispositivo elétrico é chamado de capacitor, consistindo de dois materiais condutores separados por um material isolante, capaz de armazenar energia em forma de campo elétrico nesses condutores. A capacitância, portanto, define exatamente essa capacidade de armazenamento.

A Equação 2.4, que também descreve o conceito de capacitância, é relacionada à geometria do elemento que armazena energia em forma de campo elétrico com a constante dielétrica, que diz respeito à característica utilizada pelo isolante entre as placas do elemento capacitivo. Ela é dada por

$$C = \frac{A}{d}\varepsilon, \qquad (2.4)$$

em que A representa a área da placa congruente, em metros quadrados  $[m^2]$ ; d é a distância de separação das placas, em metros [m]; e  $\varepsilon$  representa a constante dielétrica [pF/m]. Matematicamente, a constante dielétrica relativa representa a razão entre a carga obtida ao se aplicar tensão no capacitor e a carga que existiria se os eletrodos estivessem separados pelo vácuo. Quanto maior for o valor da constante dielétrica do material que separa as placas, maior será o valor da capacitância associada a esse capacitor.

Na Figura 2.4 é representado os elementos descritos pela Equação 2.4.



Figura 2.4: Representação esquemática da construção típica de um capacitor de placas paralelas. Fonte: (RÊGO SEGUNDO e RODRIGUES, 2015)

Sob uma tensão contínua o capacitor tem comportamento de circuito aberto em regime permanente, acumulando carga em sua armadura condutora. Já sob uma fonte de tensão alternada, produz o efeito de condução elétrica dessas cargas (RÊGO SEGUNDO e RODRIGUES, 2015).

Segundo <u>Rêgo Segundo *et al.*</u> (2014), a característica dielétrica consta como importante parâmetro para mensurar a umidade de materiais, devida à grande diferença da constante dielétrica relativa de materiais secos em relação à água (aproximadamente 5 para sólidos granulados secos e 80 para água destilada). A distribuição das cargas de um capacitor na presença de um material dilétrico, em que  $\varepsilon_{dieletrico}$  é a constante dielétrica inerente ao material representado. O termo geral para designação é permissividade elétrica, que é constante até aproximadamente 1 GHz, sendo, portanto, chamada de constante dielétrica quando se usa sinais de excitação do sistema até esse valor.

#### Medições capacitivas

Como mencionado, o uso de abordagens baseadas em variações de capacitâncias para detecção de teor de umidade já é amplamente conhecido. Paralelamente, possui desvios de aplicação para medição de nível, com resultados conhecidos bem eficazes. De acordo com Anaraki (2013), o interesse no desenvolvimento de sensores capacitivos têm sido amplamente empregado em aplicações industriais, inclusive em tarefas de análise e diagnóstico de máquinas. O uso de sistemas que utilizam sensores capacitivos almeja buscar um custo benefício ótimo às aplicações em que são empregados (PEREIRA *et al.*, 2016).

Existem vários tipos de transdutores que utilizam, para seu funcionamento, a variação de um dos três parâmetros elétricos fundamentais: resistência, indutância e capacitância.

O uso dos sensores capacitivos está intimamente relacionado à aplicações científicas e industriais, compreendendo medições indiretas de umidade, como por exemplo, umidade em relação ao deslocamento de detecção. Seu funcionamento se dá a partir de variações da capacitância, ou pela mudança da característica do material dielétrico monitorado, ou pela modificação da distância entre os eletrodos do sensor (WEBSTER, 1999).

Sensores capacitivos podem ser utilizados para medir indiretamente o teor de água de mensurandos granulados (como minério de ferro, por exemplo), em que a variação da capacitância desse sensor se dá devido a variação da constante dielétrica do meio (LAGE, 2018; RÊGO SEGUNDO *et al.*) 2019a; SILVA *et al.*, 2017). Essa variação, por sua vez, está principalmente relacionada à variação de seu teor de água (RÊGO SEGUNDO e RODRIGUES, 2015; RÊGO SEGUNDO *et al.*) 2011, 2019b, 2010). Além disso, a abordagem não invasiva é a mais adequada em pesquisas relacionadas a constante dielétrica de líquidos (ANARAKI, 2013). Adicionalmente, outra vantagem na medição sem contato é evitar possíveis reações químicas indesejáveis entre o mensurando e o eletrodo do elemento sensor, somado à possibilidade de ocupação de espaço físico dos componentes do sistema de medição no interior de um recipiente ou reservatório alvo, interferindo volumetricamente em sua capacidade (SILVA *et al.*, 2017).

#### **2.1.3.** Capacitores coplanares

Um capacitor coplanar consiste na mesmo dispositivo elétrico supracitado, onde seus eletrodos se dispõem em um arranjo de mesmo plano, o que modifica, consequentemente, a disposição do seu campo elétrico produzido. A distribuição de linhas de campo para uma configuração capacitiva coplanar não é uniforme. O efeito conhecido na literatura como cam-

pos de franjas (*Fringing Fields*) ou efeito de borda, que afasta o valor teórico de capacitância estimado por fórmula, é acentuado quando a orientação das placas muda de paralela para co-planar.

Para determiná-la, é comumente utilizado a teoria de mapa conformal (GEVORGIAN e BERG, 2001; NASSR *et al.*, 2008), baseada na transformação de Christoffel-Schwarz (VEN-DIK *et al.*, 1999). Segundo Warwick (2003) e Gevorgian e Berg (2001), a teoria consiste em remodelar o arranjo coplanar em um par de eletrodos capacitivos paralelos, sem as franjas de campo. O rearranjo pelo método do mapa conformal é demonstrado na Figura 2.5. Na Figura 2.5(a) é mostrado a estrutura coplanar no plano Z e na Figura 2.5(b) é ilustrado a reconfiguração da mesma estrutura em um retângulo no plano W.



Figura 2.5: Mapa conformal de uma estrutura coplanar. Adaptado de Gevorgian e Berg (2001); Vendik *et al.* (1999)

A capacitância, portanto, é calculada da Figura 2.5(b) por:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{K(k')}{2K(k)},\tag{2.5}$$

em que K(k) é a integral elíptica total de primeira ordem, k é o módulo da integral elíptica,  $\varepsilon_0$ é a permissividade do vácuo e  $\varepsilon_r$  é a constante dielétrica do meio atravessado pelas linhas de campo (VENDIK *et al.*) [1999).

Por meio da transformação de Christoffel-Schwarz e arrastando-se a representação retangular para contemplar apenas o primeiro quadrante do plano W, é possível apresentar o retângulo resultante na Figura 2.6.



Figura 2.6: Consideração para a transformação conformal no plano W. Fonte: (GEVORGIAN e BERG, 2001)

O módulo obtido com a Figura 2.6 é

$$w_1 = K(k) + jK(k'),$$
 (2.6)

A capacitância do modelo retangular (placas paralelas) também pode ser descrita, com base na Figura 2.6, como

$$C = \varepsilon_0(\varepsilon - 1) \frac{K(k')}{K(k)}.$$
(2.7)

Dessa forma, ainda segundo Gevorgian e Berg (2001), K(k) e jK(k') completam a integral elíptica de primeiro grau com  $k' = \sqrt{(1-k^2)}$ . Seu módulo pode ser também transformado para uma razão entre duas tangentes hiperbólicas, cujos argumentos são formados apenas pelos parâmetros físicos construtivos das estruturas, de forma que

$$k = \frac{tanh(\frac{\pi g}{2h})}{tanh(\frac{\pi (s+g)}{2h})}.$$
(2.8)

Para a determinação da capacitância do modelo retangular sem material dielétrico entre suas estruturas, além do ar, obtém-se

$$C_a = \varepsilon_0 \frac{K(k_0')}{K(k_0)},\tag{2.9}$$

em que o limite linear de ar tende ao infinito,  $(\varepsilon - 1) = 1$ ,  $k_0 = \frac{g}{(s+g)}$  e  $k'_0 = \sqrt{(1 - k_0^2)}$ .

Logo, a capacitância total do modelo de estrutura coplanar (Figura 2.5(a)) é  $C_t = C + C_a$ , podendo ser descrita também como

$$C_t = \varepsilon_0 \varepsilon_{eq1} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)}, \qquad (2.10)$$

sendo  $\varepsilon_{eq1} = 1 + (\varepsilon_1 - 1)q$  a constante dielétrica equivalente da combinação de ar e o material corresponde a  $\varepsilon_1$ , mais o fator de enchimento.

De acordo com Nassr et al. (2008) e Gevorgian e Berg (2001), para estimar pelo mesmo

método a capacitância da estrutura coplanar utilizando-se duas camadas de material dielétrico distintas, tem-se uma mesma definição de q, sendo ela

$$q_i = \frac{1}{2} \frac{K(k_i')K(k_0)}{K(k_i)K(k_0')}; i = 1, 2.$$
(2.11)

Pela mesma Equação 2.10 é possível calcular a capacitância total da montagem, considerandose uma nova constante dilétrica equivalente  $\varepsilon_{eq1} = 1 + (\varepsilon_1 - 1)q_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)q_2$ . Para ajuste da transformação k e k' calculada a priori, é necessário evidenciar o índice (i = 1, 2), obtendo-se

$$k_i = \frac{tanh(\frac{\pi g}{2h_i})}{tanh(\frac{\pi (s+g)}{2h_i})};$$
(2.12)

$$k_i' = \sqrt{(1 - k_i^2)}.$$
 (2.13)

A ideia dissociativa das constantes dielétricas das camadas constitui a ideia principal do método, também chamado de capacitância parcial, filtrando as camadas por uma "parede magnética", impedindo sua influencia mútua. A constante dielétrica equivalente  $\varepsilon_{eq-i}$  leva em conta essa influência para cada material dielétrico (VENDIK *et al.*, 1999).

Como limitação do método, a constante dielétrica do material mais próximo à estrutura coplanar deve ser maior que a do material mais afastado. Caso contrário, decresce-se muito a precisão do método apresentado (GEVORGIAN e BERG, 2001). Para Vendik *et al.* (1999) e Deleniv (1999), o método de capacitância parcial é aplicável se a inequação  $2g \le 10h_2$  é satisfeita para  $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b} \ge 10^2$ , em que  $h_2$  é a espessura do material dielétrico mais distante da estrutura coplanar e  $\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_b$  são as constantes dielétricas mais próxima e mais distante da estrutura, respectivamente. Adicionalmente, deve-se satisfazer, para o material dielétrico mais distante da estrutura de estrutura coplanar, a inequação  $2g \le 0,5h_3$ .

Com essas restrições, pode-se afirmar que as aproximações do método não excederão  $\pm 1\%$ . A razão é que o conceito de "paredes magnéticas" serve para separar em camadas os materiais dielétricos sob influência das linhas de campo elétrico da estrutura coplanar. Para distâncias maiores do que as apresentadas pelas inequações, as linhas de campo não estão mais concentradas dentro da camada escolhida, estendendo-se além dela e, consequentemente, vio-lando o conceito de separação.

Sensores coplanares não invasivos podem ser modelados como dois eletrodos adjacentes sobre uma meio dielétrico de revestimento, como mostrado na simulação da Figura 2.7. Como pode ser observado, a intensidade do campo elétrico diminui exponencialmente ao longo da espessura do material sob teste, em que as variações no material dielétrico mais próxima da superfície dos eletrodos tem uma influência maior na capacitância produzida (NASSR *et al.*, 2008).



Figura 2.7: Região de sensoriamento de um sensor capacitivo coplanar. (a) Distribuição de linhas equipotenciais obtidas por FEM e (b) linhas de campo elétrico. Adaptado de Nassr *et al.*] (2008)

Analisando-se as possíveis aplicações de sensores capacitivos coplanares, é necessário contrabalancear a teoria envolvida com a representatividade nas medições para o processo monitorado. Como forma de determinação da capacitância de estruturas coplanares que não respeitam as limitações do método de "paredes magnéticas", é possível ainda estimar a capacitância de uma arranjo de eletrodos capacitivos coplanares sem a utilização do conceito de integral elíptica.

Segundo Paul (2007), as considerações para cálculo da capacitância são de que a espessura dos condutores é zero e que o meio dielétrico ao qual os condutores estão embutidos seja homogêneo, onde a permissividade  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  e a permeabilidade  $\mu = \mu_0$ . O sistema de equações é

$$\begin{cases} \ln\left(-2\frac{\sqrt[4]{1-\frac{s^2}{(s+2w)^2}}+1}{\sqrt[4]{1-\frac{s^2}{(s+2w)^2}}-1}}\right) \\ C = \varepsilon_r l \frac{\sqrt[4]{1-\frac{s^2}{(s+2w)^2}-1}}{377\pi\nu_0}, \quad 0 < \frac{s}{(s+2w)} \le \frac{1}{\sqrt{2}}; \\ C = \frac{\varepsilon_r l}{120\nu_0 \ln\left(-2\frac{\sqrt[4]{1-\frac{s^2}{(s+2w)^2}}+1}{\sqrt[4]{1-\frac{s^2}{(s+2w)^2}}-1}}\right)}, \quad \frac{1}{\sqrt{2}} < \frac{s}{(s+2w)} \le 1; \end{cases}$$
(2.14)

em que *w* é a largura do eletrodo em metros [m], *s* é a distância de separação entre eles dada em metros [m],  $v_0$  é a velocidade da luz no vácuo dada em metros por segundo [m/s],  $\varepsilon_r$  é a constante dielétrica de um material sob teste e *l* é o comprimento da estrutura coplanar.

Como limitação, este modelo não determina a capacitância coplanar para uma combinação de dois ou mais materiais com constantes dielétricas diferentes. Para capacitâncias de meios mistos, é possível a realização de um teste empírico em laboratório, com abordagem de placas paralelas, para que a constante dielétrica mista desejada seja determinada por meio de interpolação. De posse do valor da constante dielétrica equivalente, a aplicação da fórmula pode alcançar uma assertividade maior comparada com o procedimento experimental.

De acordo com Mamishev et al. (2004), o cálculo da profundidade de penetração das

linhas de campo elétrico de um sensor capacitivo coplanar é proporcional apenas à largura dos eletrodos e a distância entre eles. Essa relação é dada por

$$T = 1,35g + 0,65s \tag{2.15}$$

onde T, g e s são dados em milímetros [mm]. Pela relação descrita, observa-se que quanto mais distante os eletrodos se posicionarem entre si, maior será o alcance em profundidade das linhas de campo elétrico por ele produzidas. A seleção ótima dos parâmetros de g e s, portanto, dependem do objetivo do desenvolvedor e da aplicação.

É válido salientar também que, sem um fator construtivo exato como o apresentado na maioria dos encapsulamentos industriais de componentes eletrônicos, a amplitude do erro entre o valor teórico e o experimental, independente do método, é diretamente afetada, bem como a susceptibilidade à formação de uma componente indutiva, que também pode vir a influenciar os resultados das medições capacitivas.

#### 2.1.4. Shield

Sabendo-se dos efeitos prejudiciais às medições capacitivas do fenômeno de franjas de campo, torna-se necessário se resguardar desse tipo de efeito. Para isso, os *shields* são elementos físicos dedicados à esse tipo de proteção no ato de sensoriamento, principalmente capacitivo, auxiliando na minimização do efeito das linhas de campo elétrico que não interessam ou atrapalham o sistema de medição.

Analisando o acoplamento de uma estrutura coplanar capacitiva ao material sob teste, a região sensorial de interesse vai sempre se resumir a um dos dois hemisférios dos eletrodos. Portanto, recomenda-se, usualmente para esse tipo de aplicação, a utilização de *shields* conforme é mostrado na Figura 2.8 (INSTRUMENTS, 2019). Na esquerda da Figura 2.8 o sensor capacitivo coplanar livre possui sensibilidade para detecção de objetos em quaisquer um de seus dois hemisférios, enquanto na direita da Figura 2.8, a região de sensoriamento, conforme demonstra as setas vermelhas, é orientada a identificar apenas objetos de um lado dos eletrodos.



Figura 2.8: Linhas de campo elétrico entre *ch* e *gnd* Adaptado de (INSTRUMENTS, 2019)

Além de direcionar as linhas de campo de maneira arbitrária, o shield ainda possui a

função de proteção do sinal analógico contra as interferências eletromagnéticas do ambiente. A própria transmissão de um sinal analógico, proveniente de sensoriamento capacitivo, já faz uso deste tipo de proteção, por meio de cabeamento blindado. Na Figura 2.9 é ilustrado o prejuízo metrológico causado ao resultado de medição quando vários elementos externos, fontes de ruído, influenciam o sinal analógico capacitivo.



Figura 2.9: Comparação de transmissão de sinal analógico com e sem *shield*. Fonte: (INSTRUMENTS, 2019)

O circuito equivalente da configuração coplanar de eletrodos capacitivos e suas possíveis interferências externas podem ser representados conforme Figura 2.10, onde é observado que a proximidade da mão humana, ou de outra fonte de ruído já gera uma ramificação no circuito, de maneira paralela, acrescentando seu valor capacitivo à medição. No modelo de circuito elétrico equivalente apresentado, *CINx* representa o eletrodo positivo do par coplanar,  $C_w$  é a capacitância da água dada em farads [F],  $R_w$  é a resistência elétrica da água dada em ohms [ $\Omega$ ],  $C_p$ é a capacitância do reservatório de água dada em farads [F] e  $C_h$  é a capacitância causada pela interferência externa, por proximidade ou toque, dada em farads [F].



Figura 2.10: Modelo elétrico convencional que contempla a interferência externa (mão humana).

Adaptado de Instruments (2019)

## 2.2. Comportamento da umidade em partículas sólidas

De acordo com Chaves (2015), o processo de beneficiamento de minério de ferro, referenciado por este trabalho, são geralmente realizados a úmido. Na Vale por exemplo, existem casos específicos de algumas minas que estão migrando suas operações para o beneficiamento à umidade natural e enfrentando dificuldades típicas dessa transição. Ao se preparar o produto para transporte, ou mesmo para virar insumo das indústrias siderúrgicas, é primordial que parte dessa água do produto seja retirada. As principais operações responsáveis por essa eliminação são o espessamento, filtragem e secagem e, geralmente, ocorrem nessa ordem no processo.

Em partículas sólidas, é necessário que seja considerado o nível de porosidade, bulbos, trincas e capilares, para que seja elucidada em quais lugares pode-se gerar acúmulo de umidade. A Figura 2.11 representa as imperfeições inerentes de particulados sólidos, conforme citado anteriormente.



Figura 2.11: Representação de imperfeições características de partículas sólidas. Fonte: (CHAVES, 2015)

A umidade de um material, em base úmida, é a relação entre a massa de água e a massa de sólidos mais a massa de água, ou seja,

$$U = \frac{m_a}{m_a + m_s} \times 100, \tag{2.16}$$

em que U é a porcentagem de umidade  $[kg/kg * 100^{-2}]$ ,  $m_a$  é a massa de água e  $m_s$  é a massa de sólidos, ambas em quilos [kg].

Em mineração, geralmente utiliza-se por convenção a umidade à base úmida quando se discute esse tópico aplicado à tratamento de minérios.

Para o minério de ferro, o fator de porosidade não chega a ser uma característica muito relevante pela sua alta compactabilidade, diferentemente para a ganga (material estéril). Porém, em outros particulados, a remoção da umidade em excesso em sua estrutura molecular, via operação unitária de secagem, exigiria uma demanda energética de aquecimento grande, po-

dendo em alguns casos não conseguir a completa remoção dessa umidade ou até mesmo ocasionar a ruptura da partícula.

Quando a umidade faz parte da estrutura cristalina de algum mineral, só é possível liberá-la por meio do processo químico chamado calcinação. A umidade higroscópica é formada por uma camada de água, com espessura de 2 a 5 moléculas adsorvidas na superfície das partículas do meio poroso e, devido às forças de adesão, são difíceis de serem removidas. Essa remoção se dá, geralmente, pela mudança de fase (SU *et al.*) 2014). A umidade capilar está presente nos menores poros do meio, e é mantida ali devido à coesão e à adesão contra a força gravitacional, causadas pela força capilar devido à tensão superficial da água (BRIGGS, 1897). Para existir umidade capilar, sempre haverá uma linha com três fases, sólida, líquida e gasosa. A umidade gravitacional é composta pela água que se movimenta livremente no meio de partículas porosas devido à força gravitacional. Encontra-se, portanto, nos macroporos e a sua movimentação é rápida, em que se estiver presa em capilares, escoará por gravidade. Ao final desse escoamento, restarão apenas duas fases fases líquida e sólida (SU *et al.*), 2014). A Figura 2.12 elucida as diferenças entre os conceitos apresentados.



Figura 2.12: Diferenças da umidade em partículas sólidas.

Quando o método de beneficiamento mineral é feito por operações a úmido, é necessário incorporar operações de desaguamento no circuito. Se o processo à jusante requerer baixas umidades (menores que 10%) para atender exigências de comercialização e transporte, após o desaguamento é necessária uma operação de secagem. Essa secagem é bastante dispendiosa e, por isto, deve ser reduzida ao mínimo necessário, garantindo um produto final sólido com a umidade comercial desejada, por meio de de um custo mínimo e uma taxa de aproveitamento energético (aquecimento) máxima. Um dos problemas que essa área de estudo enfrenta atualmente é a falta de um método indireto e confiável para medição de umidade do produto. Solucionar essa deficiência auxiliaria o atingimento dos objetivos de otimizar os processos de desaguamento, minimizar o consumo energético e o custo associado à secagem.

#### 2.3. Amostragem e tratamento de minério

Para que uma análise significativa seja feita, levando-se em consideração a vazão mássica de material que é processado por dia nas unidades de concentração e beneficiamento de minério

de ferro, são necessárias as definições de critérios para a obtenção de amostras representativas. É baseando-se em um bom procedimento amostral que consegue-se alcançar qualidade e assertividade na avaliação de depósitos minerais e no controle de processos industriais (ALLEN, 2013).

Segundo Sampaio *et al.* (2007), a falta do emprego de técnicas de amostragem no meio industrial conduz a uma severa indução de erros sistemáticos nas análises. Isso pode levar à inviabilização da aceitação da qualidade do produto, dificultando a verdadeira identificação de suas características. A proximidade entre os resultados da análise e as características reais da porção mineral total a ser descrita, baseia-se principalmente na minimização dos erros sistemáticos do procedimento amostral.

As etapas macros do procedimento amostral, para se chegar a um lote final finito e representativo de um universo ou lote, está representada na Figura 2.13. Sumariamente, primeiro uma estratégia de amostragem é determinada, em seguida coleta-se uma amostra, prepara-se a mesma e, por último, determinam-se seus parâmetros qualitativos.



Figura 2.13: Diagrama de blocos genérico do processo de amostragem em tratamento de minérios.

Fonte: adaptado de Sampaio et al. (2007)

Para Gy (1998), a representatividade amostral dependerá se a combinação da média e a variância do erro de amostragem encontram-se menores que o limite estabelecidos pelas partes envolvidas. Os erros de amostragem nunca conseguirão efetivamente ser nulos para determinação de qualidade de um lote, sendo eles o erro fundamental, o erro de segregação e agrupamento e o erro de integração.

Se fosse considerado uma amostragem em que fragmento por fragmento fosse coletado,
cada um com a mesma probabilidade, ainda existiria um erro entre o teor real do lote (desconhecido) e o teor da amostra, sendo esse denominado erro fundamental de amostragem (FSE). Portanto, esse erro é a única incerteza supracitada que não pode ser reduzida a zero, não importando o quão favorável a técnica de amostragem for executada, sendo considerado a parcela do erro total de amostragem mínima e irredutível (EL HAJJ, 2013). Segundo Pitard (1993), a teoria de amostragem de Pierre Gy diz que a heterogeneidade constitucional é uma propriedade intrínseca inerente de um lote alvo de amostragem.

Quanto às definições dos erros de segregação e agrupamento, estatisticamente são a representação da consequência de heterogeneidade distribucional (PITARD, 1993). Como, em casos práticos é inviável a amostragem por unidade de fragmentos de um lote, a composição de uma amostra não é completamente aleatória, sendo, na verdade, composta por um grupo aleatório de fragmentos. Dessa forma, existe, inerente à escolha arbitrária desses grupos, um erro associado. Quanto maiores os grupos, maiores os erros. Essa descrição conceitua os erros de segregação e agrupamento (EL HAJJ, 2013).

Ainda segundo El Hajj (2013), o erro de integração por sua vez baseia-se na quantificação da variação de teor e massa, parâmetros considerados complementares entre si. A base temporal dessa quantificação relaciona-se ao curto prazo, longo prazo e eventos cíclicos, em que suas origens refletem essencialmente a influência das atividades humanas.

Com base na elucidação dos possíveis erros de amostragem envolvidos na elaboração de amostras minerais, será apresentado nas subseções seguintes duas técnicas das quais esse trabalho usufruiu para que os experimentos com o transdutor capacitivo proposto fossem realizados.

## 2.3.1. Amostragem em lotes manuseáveis

De acordo com Sampaio *et al.* (2007), a estratégia de amostragem do minério totalmente seco ou sob forma de polpa minimiza os erros de segregação. A presença de umidade intermediariamente à esses dois casos, leva à aglomeração das partículas mais finas, contribuindo para o aumento dos grupos aleatórios de fragmentos de um determinado lote. Um padrão recomendado no procedimento de amostragem de minérios é de que o ato da coleta do material seja feita com ele em movimento, obedecendo a um regime de operação.

A amostragem propriamente dita subdivide-se em manual e automática, em que essa última oferece benefícios que minimizam consideravelmente os tipo de erros apresentados neste capítulo. Apesar disso, a amostragem manual é uma a técnica bastante difundida ainda em tratamento de minérios e no setor industrial.

### Amostragem em Polpas

Ainda segundo Sampaio *et al.* (2007), a maioria das usinas de beneficiamento mineral utilizam operações unitárias a úmido, fazendo da amostragem de polpas um procedimento bem frequente nas plantas industriais. Geralmente cada circuito que compõe a planta operacional

possui um ponto fixo de amostragem, onde a polpa amostrada escoa através de um amostrador. Os amostradores mais comum são válvulas manuais ou automáticas, flangeadas à adaptação feita na tubulação do circuito de escoamento (flotação, por exemplo) dedicada a esse fim.

Caso a amostra retirada do fluxo contínuo do processo exceda o volume requerido ou comportado do receptáculo utilizado, equipamentos auxiliares para que essa amostra seja reduzida volumetricamente e, mantenha sua representatividade, se fazem necessários. Um quarteador de polpa muito comum para esse tipo de aplicação é o carretel.

## 2.3.2. Homogenização e quarteamento

O método de pilha de homogenização é amplamente utilizado para alimentação do circuito de beneficiamento das usinas de concentração mineral. Para uma alimentação uniforme dos minerais constituintes, as pilhas devem ser pré-homogeneizadas, seguindo técnicas de homogeneização de pilhas cônicas ou longitudinais, por exemplo, conseguindo manter as características de alimentação de uma planta industrial por até uma semana (SAMPAIO *et al.*, 2007).

No detalhamento das metodologias que abrangem esse tópico tão importante quanto a amostragem, que fornece a amostra primária ilustrada pela Figura 2.13, a homogenização e o quarteamento são, também ilustradas na mesma figura, se fazem necessários para que os procedimentos com sistemas instrumentados e até os testes em laboratório sejam realizados.

Portanto, a homogenização de uma amostra primária busca uniformizar a distribuição de seus materiais constituintes, para possibilitar sua redução em porções menores, que por sua vez é chamada de quarteamento. Nesse sentido, existem vários procedimentos metodológicos, tanto os que envolvem ferramentas simples, quanto os que envolvem equipamentos mais robustos. Tais metodologias se diferem em vários aspectos: capacidade de processamento, espaço de trabalho, custo de execução/investimento e tempo.

### Pilhas cônicas

A técnica de pilha cônica é uma metodologia que não só resulta na homogenização da amostra primária, mas possibilita, em sequência, sua redução volumetrica, enquanto mantém a mesma relação de representatividade para com o universo amostral que a originou.

Descrevendo suas etapas de execução, segundo Sampaio *et al.* (2007), a amostra primária deve ser depositada em uma lona quadrada e resistente, para que o arraste e manipulação de minério seja feita com mais destreza quanto possível. Com o minério espalhado por toda sua superfície, eleva-se os vértices da lona, alternadamente, transformando o que antes era topo da pilha (que foi arrastado para as extremidades da lona) em sua base. A medida que esse procedimento se repete, com uma quantidade significativa de passadas, a pilha é considerada homogênea. A segregação da pilha deve ser simétrica em relação ao topo do cone. Esse último então é achatado, e toda a pilha é dividida em quatro porções, geralmente auxiliados por um

utensílio chamado cruzeta, que pode ser observado na Figura 2.14.



Figura 2.14: Instrumento quarteador de cruzeta. Fonte: (DIALMÁTICA, 2012)

Das quatro frações obtidas da pilha original, duas, em diagonal, são descartadas, e as outras duas restantes são reunidas. Executa-se essa redução pela metade do volume que o quarteamento se inicia até que se alcance a amostra final anteriormente ilustrada.

Esse método é indicado para minérios com uma característica de heterogeneidade e granulometria baixas. É amplamente utilizado pois é de simples entendimento e execução.

## 2.3.3. Método padrão de estufa

Consiste em uma metodologia gravimétrica com elevada precisão. Baseia-se na retirada de amostras finais de solo ou minério de um universo amostral e encaminhamento, por meio de recipiente fechado, para uma estufa. Uma pesagem de precisão é feita no momento que antecipa a entrada da amostra na estufa e no que sucede a sua retirada, após decorridas 24 horas de secagem. A temperatura da estufa deve ser mantida em todo o procedimento à 105°C, até no máximo 110°C. Com os valores de massa de entrada e saída (massa de sólidos) do procedimento, calcula-se o valor de massa de água que foi evaporada e, a partir da obtenção dessas duas informações, aplica-se a fórmula de umidade na base de interesse (RÊGO SEGUNDO *et al.*, 2011, 2010).

Para medição de umidade, é interessante a opção de metodologias e instrumentos que forneçam resultados on-line, possibilitando a atuação corretiva nos sistemas de controle da planta para ajuste instantâneo dessa variável de processo. Portanto, existe oportunidades para o desenvolvimento de uma solução de medição de umidade de maneira on-line, que entregue resultados instantâneos às salas de controle industriais.

# 3. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas as metodologias básicas de medição por variação da constante dielétrica, utilizando sensores e transdutores capacitivos e alguns exemplos comerciais de equipamentos aplicados na indústria.

# 3.1. Métodos capacitivos de medição aplicados na indústria

De acordo com Huang *et al.* (1988), os circuitos de medição capacitivos podem ser classificados em quatro grandes categorias ou princípios fundamentais. Os princípios básicos são o de ressonância, carga e descarga, pontes CA e osciladores. Para as aplicações recentes de sistemas de medição capacitivos, ainda é cabível essa classificação, pois trata-se de um agrupamento genérico por princípio de funcionamento.

O método ressonante permite mensurar um valor de capacitância desconhecido e seu elemento de perda paralelo (representação elétrica real) sobre um sinal de frequência com uma ampla faixa de variação (kHz - MHz). Na Figura 3.1(a) é apresentado um circuito ressonante básico de medição, em que  $V_1$  é tensão de alimentação [V],  $C_1$  é o capacitor conhecido [F] L é a indutância conhecida [H],  $C_x$  é a capacitância do sensor [F],  $G_x$  a condutância do sensor [S], e  $C_{s1}$  e  $C_{p1}$  são capacitâncias parasitas [F]. Esse método é bastante aplicável para medições de propriedades dielétricas constantes.



Figura 3.1: Representação elétrica do método ressonante: (a) Circuito típico de medição por ressonância e (b) circuito ressonante com imunização e detector de corrente. Adaptado de Benadda *et al.*] (1982); [Huang *et al.*] (1988)

Na Figura 3.1(b) é mostrado uma configuração desse circuito ressonante de medição imune à capacitância  $CP_1$ , adequando o método para medições de baixos valores de capacitância.

Para execução deste método é necessário ajustar a frequência de ressonância, identificála, calcular a capacitância desconhecida e o valor de perda do circuito equivalente. Os dois primeiros requisitos são geralmente realizados manualmente, dificultando o monitoramento contínuo e direto de variáveis físicas (transdutores capacitivos online).

O princípio de carga e descarga para descobrir uma capacitância desconhecida se baseia na frequência gerada por meio da comutação de chaves, que fazem parte de uma configuração de circuito mais complexa aplicada a um transdutor capacitivo. Neste exemplo de transdutor, executa-se a operação de comutação a uma determinada frequência *f* controlada por um *clock* 

externo. Na Figura 3.2(a) é apresentado um circuito típico responsável pela conversão comutativa de transdutores pelo método de carga e descarga, e na Figura 3.2(b) é apresentado a patente concedida de Fielden e Lloyd (1984), na qual claramente percebe-se as semelhanças eletrônicas entre os circuitos.



Figura 3.2: Circuito de carga e descarga capacitivos aplicado à transdutores. Adaptado de Huang *et al.* (1988) e Fielden e Lloyd (1984)

Existem também na literatura variações da configuração apresentada na Figura 3.2, como a utilização de ponte diodos baseada no princípio de carga e descarga capacitiva, por exemplo.

A configuração do circuito com o princípio de carga e descarga possui algumas vantagens. A principal seria de que o seu circuito diferencial reduz os desvios das medições médias do sistema (1 fF/1°C), assim como variações na frequência. Outra vantagem dessa configuração é que, a partir da utilização de grandes valores para os componentes  $C \in R_f C_f$ , a saída fica dependente apenas da componente CC dos pulsos de descarga de corrente, melhorando a precisão das medições mesmo submetido a altas frequências de comutação (*MHz*). Somado a isso, a medição capacitiva de interesse quase não é afetada pelos componentes de perda representada paralelamente na Figura 3.2(a), quando comparados com o valor de  $R_x$ , possuindo um tempo de comutação muito baixo comparado com a constante de tempo do produto de  $R_xC_x$ . Todavia, os circuitos supracitados também não são imunes a ruídos.

O método de ponte CA está presente em vários equipamentos de medição capacitivos de precisão, como analisadores de impedância, transdutores de microdeslocamento e equipamentos de medição dielétrica, por exemplo. Dentre os quatro princípios básicos de medição capacitivos abordados nesta seção, considera-se este como o mais preciso e estável. O circuito de ponte é formado por uma impedância desconhecida e uma de referência ( $Z_x e Z_r$ ), combinados com dois sinais senoidais com fases invertidas, com frequências de excitação maiores que 30kHz. Esse arranjo também é conhecido como ponte eletrônica *ratio-arm*. A ponte eletrônica e a ponte CA podem ser observadas na Figura 3.3]. Se a impedância do sensor  $Z_x$  for diferente da impedância fixa  $Z_r$ , uma corrente ou tensão proveniente deste desequilíbrio é gerada no ponto A e detectada pelo medidor D da Figura 3.3(a). Na Figura 3.3(b) é mostrado a implementação típica usando dois amplificadores com baixa impedância de saída para substituição das fontes de alimentação convencionais que degradam qualitativamente o circuito.



Figura 3.3: Método de ponte CA: (a) Circuito de ponte CA básica e de (b) ponte eletrônica. Adaptado de Huang *et al.* (1988)

O princípio da ponte CA entretanto, assim como os métodos supracitados, não é imune aos ruídos que afetam a estabilidade da medição, fazendo-se necessário a inclusão de um elemento capacitivo de pequeno efeito na entrada no circuito de ponte CA. A relação entre tensão de saída e a capacitância desconhecida é não-linear e o elemento de perda do capacitor influencia a amplitude e a fase da tensão de saída resultante. Por esta razão é aconselhável. O uso de métodos auxiliares de detecção de corrente podem ajudar a sanar essas desvantagens. Por meio desses elementos de detecção sensíveis, a parte real e imaginária da impedância desconhecida podem ser medidas. Uma representação, em diagramas de blocos, de um exemplo da implementação completa de um transdutor de ponte CA é mostrado na Figura 3.4. O circuito apresentado, entretanto, não possui um arranjo auto-balanceável. Para casos dessa forma de implementação desta última funcionalidade, o circuito pode medir variações menores que 1 pF.



Figura 3.4: Típico transdutor capacitivo de ponte CA. Adaptado de Richards (1982) e Jones e Richards (1973)

Aplicações usuais desse tipo de circuito são observadas em medições de concentração de sólidos em correias pneumáticas, onde o campo das partículas carregadas pode influenciar a tensão de saída do circuito, ocasionando fortes variações se não forem aplicadas técnicas mais elaboradas de tratamento de sinais.

O método de osciladores baseia-se na utilização de circuitos LC ou RC fixos, combinados com uma capacitância desconhecida  $C_x$ . A frequência de saída produzida pelos circuitos são monitoradas, sendo proporcional à capacitância do mensurando.

Por meio de circuitos osciladores LC, é possível a obtenção de ranges de frequência de monitoramento de centenas de kHz até centenas de MHz. Para frequências menores, flutuações capacitivas são agregadas às medições (1 – 1000 Hz). Na Figura 3.5 é apresentado duas abordagens típicas de utilização de circuitos de medição osciladores LC para transdutores capacitivos. Uma contém a aplicação direta do circuito oscilador e processamento do sinal, enquanto a outra dispõe de um circuito oscilador paralelo de referência, caracterizando efeito balanceador à medição.



Figura 3.5: Abordagens típicas do método oscilador. Adaptado de Huang *et al.* (1988)

Para circuitos osciladores RC, analogamente à Figura 3.5, o elemento indutivo é trocado por um resistivo, porém a configuração eletrônica permanece a mesma.

O método oscilador possui pouca sensibilidade à sua componente de perda paralela à  $C_x$ , em que é necessário observar o nível de perdas para materiais sob teste analisados. O ruído capacitivo é incorporado na medição nesse tipo de medição, se fazendo necessários meios para minimização desses efeitos.

Logo, após apresentados os princípios básicos de medição capacitiva nas quatro grandes categorias supracitadas, optou-se para a realização desse trabalho pelo método oscilador, mais precisamente em sua configuração RC. A justificativa baseia-se na relação custo-benefício oferecida pelo método, dadas as ferramentas existentes e disponíveis comercialmente por qualquer fornecedor de componentes eletrônicos comparado ao nível de exatidão que aplicações com esses circuitos podem alcançar. Outro ponto foi a fácil manipulação eletrônica e adaptação do circuito de medição para contornar possíveis situações de saturação da faixa de operação, con-ferindo à escolha a característica de versatilidade. A Seção 3.2 se dedica a apresentar alguns trabalhos relevantes para as diretrizes que este trabalho buscou atingir. Como formalização da escolha, será feito uma apresentação do circuito integrado que fez o papel de oscilador no de-senvolvimento do transdutor capacitivo de umidade.

### **Temporizador 555**

De acordo com Pereira *et al.* (2016), para medições de baixos valores de capacitância presentes na grande maiorias dos casos, circuitos osciladores são apropriados para conversão do sinal analógico, pois oferecem maior flexibilidade de configuração, operação em baixa frequência, estabilidade e custo baixo de implementação. No mesmo sentido, segundo Huang *et al.* (1988), o uso de circuito oscilador RC para medições capacitivas é o método mais popular para essa finalidade, com a restrição de sua utilização para capacitâncias menores que 0,01 pF. Esse cuidado baseia-se na diminuição da imunidade contra ruídos, da sensibilidade de medição e aumento do grau de instabilidade do sinal de frequência produzido pelo circuito, forçando a utilização de técnicas sofisticadas de tratamento de sinais para obtenção de aplicação industrial adequada e desconfigurando as duas últimas vantagens mencionadas.

Para Boylestad e Louis (2004), tratando-se de circuitos osciladores de baixo custo, o temporizador 555 (Timer 555) é um dos circuitos integrados mais comuns e versáteis encontrados no mercado. Existem três configurações básicas de funcionamento distribuídas em diversas aplicações como chaves imunes a ruído, interruptores de toque, pisca-piscas, geradores de pulso, relógios, alarmes de segurança, dentre outras. Em sua configuração Monoestável, caracteriza-se por atuar como um gatilho eletrônico. Já em sua configuração Astável, funciona como circuito oscilador, em que segundo Leal (1982), é a condição mais usual para a utilização deste CI. Em sua terceira configuração, chamada de biestável, funciona como um flip-flop, caso sua função (*discharge*) não for conectada e nenhum elemento capacitivo.

Na Figura 3.6(a) é apresentado as conexões internas e os periféricos do temporizador 555 e na Figura 3.6(b) a configuração utilizada neste trabalho, onde a tensão de saída  $V_o$  é dada em volts [V],  $C_1$  é a capacitância variável do sensor, dada em farads [F],  $C_2$  é o capacitor fixo da configuração do circuito, dado em farads [F], e  $R_1$  e  $R_2$  são as resistências fixas de configuração, dadas em ohms [ $\Omega$ ].

O tempo que a saída do CI permanece em nível alto  $(t_H)$ , nessa configuração, é dado por

$$t_H = 0,693(R_1 + R_2)C. \tag{3.1}$$

Analogamente, o tempo que a saída do CI permanece em nível baixo  $(t_L)$  pode ser descrito por

$$t_L = 0,693R_2C, (3.2)$$

em que o tempo de cada etapa modelada por essas equações, em segundos [*s*], relacionam-se ao tempo de carga e descarga do capacitor desconhecido, que comutam o estado da tensão de saída do CI à 2/3 do valor da tensão de alimentação para a carga do capacitor, e 1/3 para a descarga. A frequência de oscilação ( $F_{osc}$ ), dada em hertz [Hz], que determina a frequência de saída ( $V_o$ ) na configuração astável do timer 555 consiste, portanto, no inverso da soma dos dois períodos encontrados  $t_H$  e  $t_L$  (BOYLESTAD e LOUIS, 2004; INSTRUMENTS, 2014; LEAL,



Figura 3.6: Interior do CI Temporizador 555 (a). Circuito oscilador em configuração astável (b). Fonte: (INSTRUMENTS, 2014; SILVA *et al.*, 2017)

1982). Portanto, seu valor é dado por

$$F_{osc} = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_H + t_L} = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C_1}.$$
(3.3)

Os valores dos elementos fixos de dimensionamento do circuito foram baseados no trabalho de Rêgo Segundo *et al.*] (2010). Vale salientar que a manipulação desses valores, para patamares desejados de frequências de saída, se provou muito ineficaz. Foram testadas algumas combinações com resistores de precisão (escala de  $m\Omega$ ) para assumirem os valores de  $R_1$  e  $R_2$ , combinando com a variação concomitante de  $C_2$ , porém resultando sempre na saturação prematura do circuito. Os valores representados na Figura 3.6(b) apresentaram uma excelente adaptabilidade aos diferentes valores de capacitâncias encontradas para as diferentes substâncias e materiais sob teste utilizadas nesta pesquisa.

# **3.2.** Sensores e Transdutores Capacitivos

Tratando-se de aplicações capacitivas não invasivas relacionadas ao monitoramento da constante dielétrica de mensurandos, foi encontrado um dispositivo de medição de nível similar ao sistema proposto neste trabalho, porém aplicado a fluido refrigerante veicular. A priori, o acoplamento do sensor ao reservatório, como demonstra a Figura [3.7], é a abordagem que este trabalho também buscou para medição da umidade de minério de ferro em silos, com a adição de um sistema de conversão embutido e com o encaixe dos eletrodos ao sistema de conversão dado por pressão, diferente da invenção apresentada (DE ALMEIDA, [2013]).

Já Gong et al. (2016) propõem um sensor capacitivo com face adesiva para medição



Figura 3.7: Representação do sensor capacitivo de nível e da interface com o motorista. Fonte: (DE ALMEIDA, 2013)

de nível não invasiva em recipientes médico-hospitalares com a variação capacitiva do sensor proporcional à área do eletrodo de espessura desprezível, explorando a facilidade instalação e o baixo custo. Além disso, o trabalho contempla as características de exploração e arranjo geométrico dos eletrodos e boa linearidade, dispensando procedimento de calibração. A abordagem não invasiva e a exploração do conceito de geometria ótima de eletrodos para aquisição de sinal capacitivo fez com que o trabalho ganhasse bastante relevância na área que o contempla. A Figura 3.8 demonstra a mistura dos conceitos supracitados num equipamento prático de simples instalação.





Fonte: (GONG et al., 2016)

Similarmente à medição de nível supracitada, no trabalho de Bento *et al.* (2019) observase todo o processo de desenvolvimento, desde a confecção do elemento sensor, escolha e programação da unidade de processamento de sinais, até o elemento final de exibição da informação de nível, por meio da utilização do circuito oscilador com temporizador 555 em montagem astável. A característica não invasiva também se encontra presente nessa aplicação. A prática do desenvolvimento e construção de todos os componentes básicos do sistema de medição foi visto em diversos trabalhos consolidados na literatura, servindo como diretriz inicial para a execução deste projeto. Na Figura 3.9 é possível observar a representação esquemática macro do sistema construído e validado de Bento *et al.* (2019), bem como a configuração astável empregada para dimensionamento do temporizador 555.



Figura 3.9: Diagrama esquemático e elétrico do sistema de medição de nível baseado no método oscilador.

```
Fonte: (BENTO et al., 2019)
```

O trabalho de Demori *et al.* (2010) apresenta uma solução para análise de escoamento em dutos de líquidos bifásicos, utilizando todos os elementos básicos de um sistema de medição para essa finalidade, desde os elementos sensor e *shield* até o elemento final de visualização da informação mensurada, como demonstrado esquematicamente na Figura 3.10. Contudo, a estratégia de transmissão de sinal analógico insere uma componente a mais de ruído ao sistema. A prática de medição de baixos valores de capacitância com auxílio de *shields* busca sempre fazer essa transmissão de sinal analógico mais curta possível (e sempre com cabeamento blindado contra interferências eletromagnéticas, se for o caso de utilização de fios de transmissão). A não compensação desse tipo de problema pode acarretar perda de sensibilidade e aumento da incerteza medida. Uma possível solução viria a partir do acoplamento direto do elemento sensor ao elemento de conversão do sinal analógico.



Figura 3.10: Digrama de blocos completo do sistema de análise de fluidos bifásicos, evidenciando abordagem do elemento sensor.

Fonte: (DEMORI et al., 2010)

Aplicado à medição de umidade do solo, o trabalho de González-Teruel et al. (2019)

apresenta o desenvolvimento e calibração de uma sonda com eletrônica fisicamente reduzida e baseada no mesmo princípio de medição proposto por este trabalho. Conforme apresentado na Figura 3.5, seu trabalho particiona duas formas distintas de tratamento do sinal gerado pelo oscilador: modo de medição digital e modo analógico. A separação dos dois modos de operação pode ser bem descriminada se analisado o pseudo-código apresentado em forma de diagrama de blocos, que descreve o passo a passo de decisões para que as leituras de umidade sejam realizadas. Técnicas de economia de energia também podem ser observadas no modo de operação digital do dispositivo. Uma representação em 3 dimensões (3D) da PCI do sistema de medição de umidade do solo é apresentada na Figura 3.11. Algumas dificuldades típicas dessa aplicação como a compensação do efeito da temperatura são apresentadas. Contudo, o trabalho apresenta um excelente custo benefício quando analisados as alternativas comercialmente disponíveis de produtos similares.



Figura 3.11: PCI da sonda experimental do sistema de medição de umidade. Fonte: (GONZÁLEZ-TERUEL *et al.*, 2019)

No trabalho de Nassr *et al.* (2008), é apresentado um sensor capacitivo coplanar aplicado à medição de depósitos de água em estruturas de concretos, no sentido de identificação de falhas estruturais nesses materiais. Os parâmetros geométricos do trabalho apresentado foram selecionados com objetivo principal guiado pela aplicação desejada. A aplicação, por sua vez, buscou explorar o máximo da profundidade que a região de sensoriamento pudesse produzir, a fim de se construir um instrumento que conseguisse identificar a maior quantidade de defeitos, com variadas profundidades, quanto fosse possível. A correlação entre as medições para essa identificação variou significativamente com o aumento da profundidade que eles alcançavam, cumprindo o papel de identificador de zonas de defeitos em estruturas de concreto.

# **3.3.** Equipamentos de monitoramento de umidade

O caso do sistema de monitoramento on-line, que até meados de 2017 estava em fase de testes na mina da Vale de Brucutu, em São Gonçalo do Rio Abaixo - Minas Gerais, foi paralisado por falta de melhores resultados dentro da usina. O sistema consiste num equipamento de micro-ondas não invasivo que mede a umidade de minério em transportadores de correia, após um processo longo de calibração estática (correia em repouso). Apesar dos resultados qualitativos positivos, o equipamento não foi aprovado por haver uma alta expectativa no quesito quantitativo dos resultados obtidos para a abordagem sem contato. A análise quantitativa é necessária caso pretenda-se utilizar os resultados de medição para fins comerciais, principalmente

nas transações comerciais com o exterior, que são reguladas por órgãos internacionais. Todavia, uma análise de umidade semi-quantitativa que meça toda a massa de minério poderia ser utilizada, considerando que o padrão atual se baseia em amostragem. O método aceito internacionalmente é regulado pela norma ISO 3087 (FINA FERREIRA *et al.*) [2017), que tem força de lei, no qual, em uma das alternativas, uma amostra formada por várias alíquotas é levada ao laboratório, sendo ela quarteada e secada em forno à 105 graus Celsius, por um período mínimo de um dia. A incerteza ou erro de uma análise on-line de umidade que inspeciona toda a massa de um lote deve ser comparado com o erro global de um método amostral, que é a soma dos erros de amostragem, preparação e análise. Entretanto, para fins de ampla aceitação, qualquer método tem que ser submetido e aprovado pela Organização Marítima Internacional (IMO).

Na Figura 3.12, observa-se o layout do equipamento, bem como um diagrama esquemático da arquitetura típica para aplicações que estimam a umidade on-line em correias transportadoras. Na época da proposta, o custo da tecnologia sem impostos era de aproximadamente R\$116.000,00. Para este caso, ao somar com os custos de importação, o preço para aquisição do equipamento ultrapassou o dobro desse valor.



Figura 3.12: Sistema de medição de umidade baseada em micro-ondas apresentada pela Amira International - "Unidade TBM"(a). Desenho esquemático de arquitetura típica de analisadores de umidade on-line baseados em micro-ondas para aplicações em correias transportadoras (b). Fonte: (VIANA, 2013)

De maneira similar ao equipamento supracitado, foi encontrado uma outra empresa estrangeira com representação no Brasil e que possui uma vasta gama de soluções de instrumentação industriais para diversas aplicações. Dentre elas, existe um equipamento com o mesmo princípio de micro-ondas com medição não-invasiva ao mensurando, que determina a umidade do meio aferido com bastante precisão (faixa de 0,02-0,1% segundo o catálogo do fabricante e dependendo da aplicação). Uma variação dessa mesma solução apresenta a possibilidade de conexão em uma unidade de processamento de até oito sensores simultaneamente, o que possibilita, por sua vez, uma análise mais complexa da umidade aferida ao se somar até oito medidas em diferentes pontos de amostragem (LENOX, 2018), medindo, portanto, o perfil de umidade da amostra. A Figura 3.13 ilustra uma representação esquemática das arquiteturas de ambos os modelos. O valor de mercado para importação do pacote básico dessa tecnologia foi estimado em R\$95.000,00 (com as taxas de importação). Esse valor diz respeito à um módulo sensor de micro-ondas e uma unidade de processamento de sinais, mais suporte técnico (instalação, calibração e treinamento).



Figura 3.13: Arranjo e conexões dos instrumentos supracitados para medição de umidade online de sólidos.

Adaptado de Lenox (2018)

## 4. Estudos de caso

Neste capítulo são apresentados dois estudos de caso de usinas de beneficiamento da Vale, buscando evidenciar em cada caso motivações internas específicas que o desenvolvimento de uma solução de medição on-line de umidade, aplicada a minério de ferro, pode promover.

# 4.1. Carajás-PA

Um dos maiores projetos no contexto da mineração nacional é o PGC (Projeto Grande Carajás), consistindo na extração de minério de ferro da Serra dos Carajás, situado no município de Paraopebas, sudeste do Pará. A estrutura que opera em Carajás abrange um sistema de minas, instalações de beneficiamento, um pátio de estocagem, instalações portuárias e uma ferrovia (Estrada de Ferro Carajás) com 890 quilômetros de extensão, transportando o minério de ferro extraído na região à unidade portuária de Ponta da Madeira, em São Luís - Maranhão. Operando desde 1985, a comercialização de minério de ferro atingiu 156 milhões de toneladas em 2016 (VALE, 2017).

Na Figura 4.1 representa-se um fluxograma das operações (*work flow*) do minério de ferro desde a lavra até chegar aos navios no porto de São Luís.



Figura 4.1: Fluxograma do processo de extração de minério de ferro da Serra dos Carajás. Fonte: (VALE, 2017)

Ao longo do processo, existem cerca de 85 km de correias transportadoras para que o minério de ferro em processamento movimente-se pela usina. Na alimentação dos vagões ferroviários, encontram-se os silos de carregamento, dispostos em várias localidades ao longo do processo de beneficiamento. Na Figura 4.2 representa-se a operação de alimentação dos vagões.

Em um processo com a escala de produção do PGC, um erro de 1% de umidade entre o especificado para transporte e o efetivo após o processo de produção pode gerar prejuízos de perda produtiva de várias toneladas de produto. As medidas corretivas na umidade do minério de ferro se aplica quando esses lotes chegam ao porto e são carregados nos navios graneleiros. De acordo com Soares *et al.* (2017), o excesso de umidade no minério de ferro pode provocar interrupção de um carregamento no porto. A legislação internacional regulamenta um limite máximo permitido de umidade (TML - *Transportable Moisture Limit*) de 10,45% por lote transportado. Caso não haja adequação, é necessário uma operação de *blendagem* com o minério dos



Figura 4.2: Alimentação dos vagões ferroviários por silos de estocagem de minério de ferro em Carajás-PA.



pátios de estocagem para se atender à norma internacional e, a partir desse momento, reiniciar o carregamento. Logo, uma medição on-line se faz necessária.

# 4.2. Itabira-MG

Em um estudo de caso que começou no fim de 2014 e se estendeu até a metade de 2017, desenvolvido por uma equipe de funcionários da Vale de Itabira e Belo Horizonte, composta por engenheiros, um cientista da computação e um administrador, foi realizado um trabalho que buscou a redução de umidade no *pellet feed* da usina de Conceição I. O trabalho teve como principal objetivo o aumento da eficiência de filtragem da planta e um refinamento na análise estatística dos dados coletados. A filtragem é a última etapa do processamento da usina de minério de ferro para diminuição da umidade presente na polpa (SOARES *et al.*), [2017). Na Figura 4.3 representa-se o histórico da umidade no *pellet feed*, evidenciando o período antes e depois da implementação do projeto proposto.

Segundo os autores, o procedimento amostral da umidade adotado na pesquisa foi o método convencional de estufa, em que foi monitorada a umidade com a intenção de reduzi-la após a ação da equipe, que durou aproximadamente vinte e um meses. Os recursos utilizados e o tempo necessário para o levantamento dessas informações de umidade poderiam ser otimizados por um equipamento de medição em tempo real, que disponibilizasse os dados de maneira confiável. Uma quantidade expressiva de dados, coletados de maneira intermitente ao longo dos vários meses que o projeto foi desenvolvido, poderia ajudar a encontrar outros focos de melhorias de processo dentro da planta existente, além de preencher as interpolações feitas entre os pontos de medição da umidade com dados reais.

De acordo com (CHAVES, 2015), geralmente a determinação da umidade do produto é difícil, sendo inferida com base em experimentos. Conforme tecnologias e estudos de caso apresentados nesse capítulo, analisadores de umidade de ultrafrequência podem ser adaptados para controle da qualidade do produto ou de equipamentos no processo. Outros tipos de equipamentos bem sucedidos utilizados para este fim são os baseados em infravermelho. Em todos esses casos, o cuidado com espaços vazios no montante de minério analisado se faz necessário



Figura 4.3: Monitoramento da umidade na usina Conceição I da Vale Itabira-MG. A ação de intervenção da equipe está representada entre Dez/2016 e Abr/17. Fonte: (SOARES *et al.*, 2017)

e fundamental. Apesar da variada gama de opções, essas tecnologias não são empregadas por ainda possuírem baixa confiabilidade ou elevado custo, o que leva a umidade, na maioria dos casos, ser uma variável de saída não aferida. Este trabalho busca mitigar essa falta de um método confiável e rápido para medir a variável de umidade em linha no processo.

## 5. Materiais e Métodos

No presente trabalho desenvolveu-se um transdutor capacitivo não-invasivo para medição on-line de umidade no minério de ferro, a partir da utilização de dois eletrodos coplanares. Tevese como foco configurar um arranjo eletrônico embarcado e compacto em uma mesma placa de circuito impresso que atendesse às necessidades e facilitasse a manipulação do sistema.

Após estudo das metodologias e materiais para medição capacitiva de umidade e análise de alguns exemplos e aplicações de equipamentos capacitivos comerciais de abordagem não invasiva, iniciou-se a etapa de experimentos, sendo estes realizados nos laboratórios LABCAM e o Laboratório de Conforto Ambiental da Escola de Minas, na Universidade Federal de Ouro Preto.

As amostras de minério de ferro do circuito de flotação de uma usina de beneficiamento foram obtidas com o apoio de uma mineradora da região metropolitana de Belo Horizonte, na forma de doação. Ambas foram fornecidas na consistência física de polpa, dentro de barris lacrados. O serviço de transporte das amostras em tambores metálicos foi concedido pelo departamento de transportes da UFOP, por meio do empréstimo de um caminhão munck e do acompanhamento de um motorista certificado, para manipulação do guindaste hidráulico do veículo.

Foram realizados experimentos preliminares para diagnosticar a análise comportamental do sistema, antes de iniciar os experimentos com amostras minerais umidificadas, utilizando como material dielétrico proporções diferentes de água destilada e ar. Uma curva de densidade aparente pela umidade pode ser obtida, em que haverá um ponto de inflexão (mínimo) no qual a adsorção de água já ocorreu nas partículas sólidas, mas a amostra ainda pode absorver mais água capilar e água livre.

# 5.1. Desenvolvimento do protótipo

Esta seção apresenta a metodologia de desenvolvimento do protótipo. A sequência cronológica de sua construção seguiu quatro etapas: (i) simulação da lógica eletrônica; (ii) projeto eletrônico e construção da PCI; (iii) projeto e construção do sensor capacitivo coplanar; e (iv) implementação do protocolo de comunicação *wireless*. Contudo, antes do detalhamento de cada etapa, são relacionados os principais materiais e plataformas utilizados.

## 5.1.1. Materiais

### Microcontrolador e compilador

O microcontrolador escolhido para gerenciar as tarefas do sistema de medição de umidade foi o PIC16F873A. O modelo escolhido possui 21 I/O de uso geral, agrupados em 3 portas: A, B e C. Conta com 5 módulos de conversão A/D de 10 bits e 2 módulos de Compare/Capture/PWM (CCP). Pode ser fornecido em até 4 tipos de encapsulamento diferentes, sendo o *dual in-line pin package* (DIPP) o mais comum (MIC, 2013). Na Figura 5.1 é apresentada a disposição de pinos do PIC, para o encapsulamento DIPP.





Para sua programação em linguagem C, é necessário um intermédio de compiladores que traduzem o programa desenvolvido em um código hexadecimal, e este arquivo gerado é gravado na memória não volátil do PIC. O compilador utilizado para desenvolvimento deste protótipo foi o PCWHD Compiler, Versão 5.015.

Adicionalmente, para o procedimento de gravação do arquivo hexadecimal, outro recurso específico foi necessário. O programador PICkit 3 foi o utilizado para este fim, através do acesso de cinco pinos do microcontrolador conforme Figura 5.1: MCLR, VDD, VSS, PGD e PGC.

### Software de simulação e design da PCI

O software escolhido para simulação e projeto da placa de circuito impresso do sistema foi o Proteus Virtual System Modelling. A simulação em sua interface disponibiliza interações com atuadores, como botões e potenciômetros, além de possuir animação para a representação do funcionamento dos circuitos e permitir a utilização do *firmware* compilado. Os microcontroladores, disponíveis em sua biblioteca nativa, simulam toda a sua capacidade física e virtual configurada pelo desenvolvedor. Na parte de desenvolvimento do layout da PCI, a plataforma conta com diversos recursos de roteamento de trilhas e posicionamento de componentes, além de permitir sua edição e criação de novos modelos não mapeados. Por fim, ainda é possível exportar todos os *layers* gerados em formato compatível para produção da placa em máquinas fresadoras (LABCENTER, 2019).

#### Módulo de comunicação wireless

O módulo escolhido para a realizar a comunicação *wireless* do protótipo foi o XBee. Apresenta-se como um sistema completo de módulos sem fio, gateways, adaptadores e software projetado para acelerar o desenvolvimento sem fio em aplicações de sistemas embarcados. Possuem construção compacta, em que aproveitam múltiplos protocolos sem fio e rádio frequência adequados para todos os tipos de arquiteturas de rede (celulares, ZigBee, Thread, 802.15.4 e Wi-Fi). Além de portabilidade e compactabilidade, possui diferentes níveis de comunicação segura entre seus dispositivos (DIGI, 2018).

A frequência de operação dos módulos é de 2,4 GHz, com uma taxa de transmissão de até 250 kbps e alcance de transmissão, com visada direta, de mais de 1,6 km. Na Figura 5.2 é apresentado o dispositivo e suas respectivas dimensões físicas.



Figura 5.2: Módulo de comunicação Xbee *wireless*. Fonte: Digi (2018)

Os módulos são compatíveis com uma multiplataforma nativa de configuração, transmissão e recepção de dados chamada XCTU, que permite uma acelerada interação com o usuário para testes e implementações. A interface gráfica da plataforma XCTU permite ao usuário perceber visualmente sua rede de módulos XBee, juntamente com a intensidade de sinal de cada um dos módulos, se transformando em um *toolkit* de desenvolvimento Digi (2018).

Por meio da utilização dessa plataforma, os procedimentos de calibração e teste na miniatura de silo foram feitos, exportando-se o conjunto de indicações por amostra medida. O protocolo estabelecido entre os módulos é discutido em subseção posterior.

#### Dispositivos de visualização

Para visualização de variáveis de teste (manutenção) e de variáveis enviadas via comunicação serial, foram simulados um LCD (*Liquid Crystal Display*) e três displays de 7 segmentos.

O LCD usado nas simulações foi composto de 16 colunas por 2 linhas, com *backlight* branco e caracteres na cor preta. Também possui embutido um controlador HD44780 utilizado na indústria de LCD como base de interface. A biblioteca utilizada para comunicar o PIC16F873A com o LCD 16x2 foi a *mod*<sub>1</sub>*cd*4*.c*. Permitindo o acesso direto ao arquivo em C que a descreve, foi possível alterar os pinos de dados do PIC facilmente, adaptando a funcionalidade à disponibilidade do hardware, depois de priorizar os encaminhamentos responsáveis pela medição e condicionamento do sinal de medição. Essa biblioteca exige apenas quatro pinos de dados, agregando mais valor à escolha.

No acionamento em sequência dos displays de sete segmentos, foi necessário a elaboração

de um elemento multiplexador, que gerou a economia de hardware (saídas) para o microcontrolador. O multiplexador é baseado no princípio de funcionamento clássico de transistores, as chaves unidirecionais da eletrônica. O coletor é conectado aos cátodos comuns de todos os leds de cada display, o emissor dos três transistores são aterrados e três pinos do PIC controlam a sequência de acionamento na base dos transistores, alternadamente. Como é enviado o mesmo algarismo do PIC simultaneamente aos três displays, ao mostrar um algarismo em um display e antes do próximo ser exibido, a informação enviada pelo PIC é atualizada. Assim, no decorrer de alguns microssegundos, cada display apresenta uma palavra diferente, em *loop* infinito, de acordo com a informação processada. Através desse chaveamento, há um ganho direto com a preservação do microcontrolador, pois a soma das correntes de cada LED aceso que danificariam os pinos de controle da sequência, receberam apenas a função de *trigger* dos transistores (conectados à base), chaveando essa soma de correntes para a malha de terra do circuito.

### Silo e elementos auxiliares

O silo construído foi feito de chapa de aço convencional, espessura  $\frac{3}{8}''$ , para testes de escoamento por gravidade de minério de ferro. As dimensões foram fielmente baseadas em uma planta de secagem de minério existente no Instituto Tecnológico Vale, multiplicando suas medidas por um fator escalar que tornou o equipamento representativamente menor, e possibilitando a devida exploração de seu compartimento de descarga para instalação do sistema de medição. Paralelamente, foi construído um leito estático de madeira, com 2,0 m de comprimento, para auxílio durante o experimento com o silo. Ambas as construções são representadas pela Figura 5.3



Figura 5.3: Miniatura de silo e leito de madeira para teste em laboratório.

Em função do leito estático e para homogeneização e quarteamento de minério de ferro, uma lona resistente tipo KP 12000 (Sider) foi adquirida. A finalidade de auxílio na preparação das amostras minerais foi realizada a priori, quando ela possuia sua dimensão original de 3 m de largura, em formato quadrado. Posteriormente, ela foi cortada em tiras de aproximadamente 0,4 m de largura, unindo-se várias partes em suas extremidades, confeccionando assim uma esteira de aproximadamente 20 m lineares de comprimento. Essa esteira, como será detalhado na última seção deste Capítulo, cumpriu o objetivo de retirar o minério de dentro do silo.

#### Insumos

Os principais materiais de insumo foram utilizados para a construção de duas montagens de transdutores capacitivos coplanares.

O fenolite, material laminado plástico utilizado como isolante elétrico, cobreado em dupla face, foi utilizado no transdutor capacitivo referido como montagem 1, atuando em duas diferentes funções: (i) utilizar uma das faces cobreadas para compor os dois eletrodos coplanares"sem espessura", desenvolvidos a partir da ação de desbaste de uma máquina fresadora tipo CNC; e (ii) utilizar a outra face de cobre como *shield* de proteção eletromagnética, minimizando os efeitos de interferência na face oposta à sensora. No transdutor capacitivo referido como montagem 2, apenas a função de *shield* utilizou esse material. Os eletrodos dessa montagem foram feitos com chapas de cobre meio duro, com 3 mm de espessura, soldados em tarugos de cobre de  $\frac{3}{8}$ ". Em uma das extremidades de cada tarugo soldado foi usinado uma encaixe de rosca macho, de 10 mm de diâmetro.

As medidas de largura e comprimento dos eletrodos de ambas as montagens foram iguais, 300 mm de comprimento por 20 mm de largura, sendo justificadas na Subseção 5.1.4.

O material utilizado como revestimento dos materiais condutores foi o Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Motivado pela absorção quase nula de umidade e de fácil manuseio, possui características como isolante elétrico altamente linear, maior cristalinidade comparado à outros polietilenos da mesma família, além de excelente resistência e baixo coeficiente de atrito. Algumas de suas propriedades eletromecânicas são apresentadas na Tabela 5.1. Seu peso molecular pode variar conforme disponibilidade comercial, o que influencia diretamente suas propriedades (COUTINHO *et al.*) [2003]).

Propriedades	Altamente linear
Densidade, g/cm <sup>3</sup>	0,962 - 0,968
Constante dielétrica relativa a 1 MHz	2,3 - 2,4
Dureza (Brinell), MPa	60 - 70
Resistência ao cisalhamento, MPa	20 - 38

Tabela 5.1: Propriedades físicas e elétricas do PEAD

Fonte: (COUTINHO et al., 2003)

## 5.1.2. Simulação

Nesta etapa é apresentado um layout de simulação desenvolvido no Proteus, para realização de testes do circuito eletrônico e de lógica do *firmware* do microcontrolador.

A simulação baseou-se no encaminhamento do sinal produzido pelo monitoramento da variação da constante dielétrica do mensurando, a partir de elementos eletrônicos e lógicas de processamento, até a transformação do sinal em informação legível para o futuro usuário do sistema, seja ele local ou remoto. O ponto de partida da simulação foi o sinal de frequência produzido pelo circuito oscilador e medido pelo módulo CCP do PIC na função Capture, e a partir do sinal digital, foram inseridos os demais elementos que compuseram o projeto final da PCI.

Desde o início do projeto, foi dada atenção a alguns aspectos específicos envolvidos no desenvolvimento de sistemas embarcados de medição. Como pôde ser visto na apresentação de outros trabalhos consolidados na literatura (BENTO *et al.*, 2019; DEMORI *et al.*, 2010), existe um prejuízo metrológico sempre que se transmite um sinal analógico capacitivo por meio de condutores. Outro aspecto que chama atenção é a escassez de soluções que contemplem mais de uma camada de interface com o usuário, ou que reúna em um único hardware embarcado o elemento sensor, conversor A/D, unidade de processamento de sinais, interface de visualização local, interface de visualização de dados de teste, interface de comunicação remota da informação e alarme de falha do sistema de medição.

Com a motivação do número expressivo de entradas e saídas para atender aos itens supracitados, além da demanda por uma interface de comunicação remota sem fio e a falta de um circuito integrado comercial que contemplasse todas essas funcionalidades, o emprego de um microcontrolador como elemento gerenciador multitarefa foi justificado. Assim, foi selecionado um microcontrolador capaz de coordenar todos esses elementos, sem que sobrecarregasse sua capacidade de processamento interno. Aliado à disponibilidade dos insumos do LABCAM, o PIC18F873A foi escolhido como agente gerenciador do sistema de medição de umidade. A análise de seleção do microcontrolador baseou-se no número de entradas e saídas demandadas (funcionalidades desejadas), interface de comunicação com o dispositivo de transmissão de dados *wireless*, ambiente disponível de desenvolvimento do *firmware* e de simulação da lógica eletrônica, recursos de monitoramento de eventos externos e recursos de contagem de tempo.

Com a unidade de processamento de sinais escolhida, os periféricos do sistema, que já estavam estimados com base nas funcionalidades determinadas, foram adicionados também ao ambiente de simulação. A configuração eletrônica da simulação proposta é apresentada na Figura 5.4.



Figura 5.4: Simulação de todas as funcionalidades projetadas para o sistema.

As funções que compuseram a simulação do sistema foram:

- Interface de visualização de variáveis de teste;
- Interface de visualização da informação local;
- Interface de comunicação wireless;
- Alarme de erro;
- Firmware;

O LCD tipo 16x2 foi implementado pela necessidade de, durante o desenvolvimento do protótipo e eventuais manutenções na PCI do sistema, aferir-se o valor instantâneo das variáveis em execução no *firmware* gravado no PIC, funcionando como uma espécie de visualizador de saída, assim como os que compõem algumas IDEs (*Integrated Drive Electronics*) disponíveis comercialmente.

Para implementação, que foi idealizada exclusivamente para a operação em campo, a exibição da informação de umidade pode ser feita em até três algarismos com a utilização de displays de sete segmentos. O alcance visual do brilho dos LEDs a olho nu é maior que a maioria dos mostradores digitais tradicionais e pode ser útil para auxiliar a operação dentro da usina.

Para a comunicação *wireless* e processamento da informação remotamente, foram usados dois recursos de simulação: o *serial view* e o CONPIM. O primeiro exibe, apenas para a simulação dentro do Proteus, os valores das variáveis transmitidas via serial pelo PIC. No CON-PIM, a comunicação serial também é monitorada, porém esse recurso possibilita a interação de algum dispositivo externo ao ambiente do Proteus, seja ele físico ou virtual. **Físico** seria um sistema externo ao microcomputador que processa toda a simulação, e que conectado a ele, gera uma porta física por um de seus canais USB e que consegue comunicar com a simulação em execução; **virtual** seria um outro software que cria uma porta virtual no microcomputador, e que, analogamente, também consegue-se comunicar com a simulação em execução. Para essa simulação, o CONPIM foi testado com outro software genérico que emula comunicação serial virtualmente.

O alarme foi criado para alertar o usuário sobre um possível cenário de desvio na função de contagem do PIC, destinada a monitorar o sinal enviado pelo circuito oscilador do transdutor. Um LED para alerta visual é acionado, indicando estado de anomalia na contagem do timer do microcontrolaor.

O *firmware* foi desenvolvido para contemplar todos os periféricos implementados e, principalmente, processar o sinal de frequência recebido do transdutor capacitivo. O monitoramento do sinal de frequência do circuito oscilador é feito através de um pino específico do PIC. O módulo CCP1, associado a esse pino foi configurado para monitorar os eventos de borda de subida do sinal, em que a cada dezesseis subidas obtém-se um valor de contagem, chamada de função "*Capture*". Nesse modo de funcionamento, o valor do registrador relacionado à função (Timer 1, de 16 bits), é copiado para o registrador da interrupção via hardware (CCP1\_1), que monitora os eventos externos no pino 13. O pino desse módulo foi configurado como entrada e foi selecionada em uma contagem para cada dezesseis pulsos, com o objetivo de aumentar a resolução na medição da frequência. Desse modo, toda vez que ocorre uma interrupção, a contagem atual do Timer 1 é reiniciada, e o valor de seu registrador é gravado em uma variável global, que é manipulada dentro do laço de repetição infinito do *firmware*. Caso a contagem do Timer 1 exceda seu próprio tamanho (16 bits), outra interrupção externa é gerada automaticamente antes de seu valor ser reinicializado. O alarme indicado como S4 atuaria exatamente nesse momento, sinalizando o "estouro"da contagem do Timer1.

O circuito oscilador nessa etapa de simulação foi reproduzido por um *clock* gerador de sinais, de onda quadrada, da própria plataforma, que produz uma onda ideal quadrada com frequência ajustável.

## 5.1.3. Placa de Circuito Impresso

A Figura 5.5 apresenta a adaptação dos elementos da simulação para a entrega de um sistema prático ao usuário final, que oferece rapidez na execução de procedimentos de manutenção e facilidade de acesso aos seus periféricos.



Figura 5.5: Seleção de componentes para confecção de Placa de Circuito Impresso.

Todas as interfaces de visualização e comunicação, bem como o alarme foram substituídos por conectores ou bornes, possibilitando instalação física fora do plano da PCI, e com isso, configurando maior maleabilidade, nas conexões por cabo, no encaixe do invólucro do instrumento.

A priori, os elementos que não estavam presentes no layout de simulação foram o circuito oscilador, uma barra de pinos para para acesso aos pinos gravação do PIC e um conjunto de capacitores de desacoplamento (CD). Para bloquear qualquer componente alternada do sinal de alimentação, os CDs foram dedicados a cada um dos circuitos integrados utilizados: o PIC16F873A, o temporizador 555, o LM7805 e o módulo de comunicação *wireless* Xbee.

O arranjo da PCI foi então elaborado, conforme apresentado na Figura 5.6. Práticas recomendadas de elaboração das rotas de sinais foram implementadas, priorizando a passagem do sinal proveniente do eletrodo positivo até o temporizador 555 e o sinal de frequência do circuito desse mesmo elemento até o PIC. A expansão da ilha de conexão com os eletrodos capacitivos foi feita de forma a possibilitar uma conexão por pressão, dimensionada a partir de um dos pares de eletrodos capacitivos construídos.



Figura 5.6: Visualização da PCI desenvolvida no Proteus.

Antes de descrever a metodologia de dimensionamento e montagem dos transdutores capacitivos coplanares construídos, na Figura 5.7 é representada a PCI construída e a visualização do instrumento com acabamento final para o chão de fábrica. A ilustração busca exibir a ideia supracitada de praticidade e nitidez na exibição das informações, condensando todos os elementos eletrônicos em um só hardware para os usuários. Na Figura 5.7(a), é observada a representação real da construção da PCI, com seus elementos eletrônicos reais soldados, contendo as indicações das interfaces descritas. Na Figura 5.7(b), exibe-se a finalização da montagem do invólucro do instrumento.



Figura 5.7: Representação da PCI do sistema, antes e depois do acabamento final. Em (a) observa-se o sistema construído real e em (b) o encapsulamento final idealizado para a implantação das funcionalidades projetadas.

### 5.1.4. Sensor capacitivo coplanar

Está subseção descreve a geometria dos eletrodos coplanares construídos, aplicando o cálculo que descreve matematicamente a profundidade do campo elétrico produzido pela configuração coplanar de eletrodos. A descrição das montagens que geraram os elementos sensores finais também é explicitada, juntamente com a capacitância teórica produzida pelo arranjo final dessas montagens. Se faz necessário informar que foram feitas duas montagens com sensores capacitivos coplanares, afim de comparar o desempenho metrológico de ambas ao final dos experimentos.

Conforme descrito no Capítulo 2, a profundidade do campo de um capacitor de placas coplanares é definida pelos parâmetros geométricos, bem como a capacitância do sensor. A constante dielétrica do material localizado ao redor das placas também deve ser levada em conta, sendo diretamente proporcional à capacitância do sensor. Vale ressaltar que as equações apresentadas nesta subseção não modelam analiticamente a espessura dos eletrodos, que no caso da montagem 2 apresenta acentuada diferença com relação à montagem 1.

A profundidade (T) de campo elétrico calculado para a aplicação teve como principal objetivo monitorar parcialmente o volume de minério na descarga da miniatura de silo. A partir da característica construtiva dessa região do equipamento, foi monitorada uma das quatro faces da descarga, na intenção de que a cobertura das linhas de campo produzidas pelos eletrodos capacitivos atingisse a metade do volume de descarga. Vista de cima, a descarga do silo possui a forma geométrica de um quadrado, em que a análise da profundidade alcançada pelas linhas de campo elétrico dos eletrodos geralmente é feita a partir da mesma vista dos eletrodos capacitivos dimensionados. Portanto, a intenção foi chegar a um valor que abrangesse metade da área da descarga do silo, visto de cima, considerando uma pequena faixa neutra no corte que divide a descarga do silo em duas regiões iguais. Na Figura 5.8 é apresentada uma representação esquemática da profundidade desejada do campo elétrico capacitivo.



Figura 5.8: Estratégia de construção do design dos transdutores.

O semicírculo formado pelas linhas de campo elétrico imaginárias, que irradiam do par de eletrodos coplanares, possuem um raio teórico de curvatura proporcional à largura dos eletrodos e a distância entre eles. A largura do eletrodo foi fixada em 20 mm para contemplar o encaixe, por solda, do tarugo rosqueado que se conecta eletricamente com a PCI. A montagem 1, do arranjo de eletrodos feitas de fenolite, apenas seguiu as mesmas dimensões, visando equiparar as duas montagens e comparar seu desempenho. Portanto, os critérios de dimensionamento para os eletrodos dos transdutores foi baseado na montagem 2. Com o parâmetro fixado da largura (w), a profundidade foi definida ajustando o valor de distância entre os eletrodos (2g) e o valor representado na Figura 5.8(b). O resultado da aplicação é apresentado pela Figura 5.9



Figura 5.9: Representação das dimensões físicas e de arranjo dos eletrodos da montagem 2.

A conexão dos eletrodos com o sistema final pode ser observada na Figura 5.10, em que a mudança de acoplamento para os eletrodos feitos de fenolite se resume à parte rosqueável representada. Para os eletrodos da montagem 1 foram soldados cabos blindados na mesma posição que foram soldados os tarugos roscados de cobre.



Figura 5.10: Acoplamento, por pressão, dos eletrodos utilizados na montagem 2 na PCI construída.

A confecção dos eletrodos de fenolite, que possuem espessura desprezível e se comportam, teoricamente, mais próximos da modelagem apresentada, foi feita com as mesmas medidas, por meio de cabeamento blindado. A motivação baseou-se no aproveitamento do mesmo ponto de encaixe da PCI dos eletrodos da Figura 5.9. Utilizando a mesma referência da PCI entre as montagens, buscou-se aumentar a similaridade entre elas para estabelecer uma análise de desempenho metrológico. A Figura 5.11 representa as montagens executadas, separando em camadas e indicando os materiais utilizados em cada uma. É possível observar também as respectivas espessuras dos materiais, bem como o posicionamento estratégico escolhido para a inserção do elemento de blindagem elétrica em ambas as montagens. Na Figura 5.11(a) é representado a montagem 1 do transdutor que utiliza eletrodos de fenolite, com espessura desprezível, e na Figura 5.11(b) é representado a montagem 2, com os eletrodos feitos de chapa de cobre.



Figura 5.11: Camadas das montagens de transdutores capacitivos coplanares. Está representada em (a) a Montagem 1 e em (b) a Montagem 2.

O *shield* inserido nas duas montagens foi feito com uma das faces de cobre da placa fenolite. Em ambas as montagens, foram utilizados *shields* idênticos, pois sua escolha foi considerada ótima para a finalidade, ocupando um espaço pequeno com relação à espessura das montagens finais para os dois tipos de eletrodo e abrangendo, com uma superfície metálica única, toda a região oposta à face sensora, assim como indicado para aplicações com essa configuração. Uma conexão elétrica por meio de cabos blindados, de cada *shield*, foi feita para equipotencialização com a malha de terra da PCI.

Para a montagem 2 vale ressaltar que, diferentemente da montagem 1, em que o nivelamento da superfície dos eletrodos não foi afetada com a fresagem feita no fenolite, foi necessária a utilização de PEAD complementar para que o espaço vazio entre o *shield* e os eletrodos fosse ocupado, bem como a região em seus arredores. A partir desse preenchimento, evidenciado na Figura 5.12, o primeiro experimento foi iniciado. A região de desnível gerada entre o *shield* e os eletrodos foi ocasionada pela solda de união da chapa de cobre com os tarugos roscados, além da diferença de 3 mm da própria espessura das chapas de cobre.





A espessura dos eletrodos coplanares da montagem 2 também altera o modelo proposto pela Figura 2.10, sendo necessário a inserção de mais uma capacitância no circuito, paralela à representação do modelo elétrico convencional, conforme ilustrado na Figura 5.13. No modelo reconsolidado,  $C_1$  é a capacitância fixa gerada pela compensação do desnível dos eletrodos,  $C_2$ é a capacitância do revestimento de PEAD da face sensora e  $C_x$  é a capacitância variável do material sob teste, dadas em farads [F].





A capacitância teórica calculada pelo modelo de capacitância coplanar é apresentada na Tabela 5.2, obtida por meio da Equação 2.14. O modelo leva em conta o valor da constante dielétrica relativa de cada material que compõe o sensor coplanar. Logo, pode-se prever a faixa

de capacitância do sensor de acordo com a constante dielétrica relativa  $\varepsilon_r$  de cada material, analisado individualmente. A análise foi realizada utilizando-se as constantes dielétricas do ar, do PEAD e da água destilada — mesmas substâncias utilizadas nos experimentos realizados neste trabalho.

Tabela 5.2: Capacitâncias para o arranjo capacitivo coplanar construído com espessura desprezível

Material dielétrico	<b>Constante dielétrica relativa -</b> $\varepsilon_r$	Capacitância [pF]
Ar	1,0	3,039
PEAD	2,3	6,079
Solo/minério	5 - 40	15,20 - 121,6
Água	80 - 81	243,2 - 246,2

Para execução dos cálculos foi considerada a permissividade do vácuo como  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \approx 1,25663706 * 10^{-6}$  [H/m], a permissividade do ar como  $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \approx 8,8541878176 * 10^{-12}$  [F/m] e a velocidade da luz no vácuo como  $v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = 299792548$  [m/s].

## 5.1.5. Protocolo de Comunicação wireless

Foi necessário implementar uma rede entre dois módulos XBee, um transmissor e um receptor, estabelecendo-se, assim, uma comunicação em modo API — que consiste em um pacote de onze bytes (DIGI, 2017) — entre o sistema embarcado e o supervisório instalado em um computador de mesa.

O protocolo estabelecido entre os módulos de comunicação sem fio teve o objetivo de evitar a perda ou corrompimento dos dados, sendo o uso deste protocolo comum em aplicações *indoor*.

O pacote de dados é estruturado da seguinte maneira: o primeiro byte, chamado de *start delimiter*, é o parâmetro de reconhecimento do módulo receptor que indica o início do pacote de dados. Em seguida, existem dois bytes que determinam o tamanho desse pacote, de forma que seja antecipado qual o tamanho dos dados a ser recebido — um byte mais significativo (msb) e um menos significativo (lsb). O próximo byte determina o tipo de pacote (*Frame Type*), indicando uma transmissão ordinária de dados, uma requisição ou um comando de configuração do XBee. Logo em sequência, existe um byte de identificação (*Frame ID*) que confirma se o módulo receptor, de fato, recebeu corretamente o pacote até então ou não. Em seguida, tem-se mais dois bytes representando o endereço (*Address*) do módulo XBee transmissor do pacote de dados. Um byte opcional de informação (*Optional Info*) para caracterizar melhor o pacote pode ser usado após a informação de endereço e, finalmente, os dois bytes de dados de leitura, após o processamento do microcontrolador, acompanhado de um byte de verificação dessa informação (*Check Sum*). A Figura **5.14** apresenta o fluxograma de execução de cada pacote de dados transmitido, implementado entre os módulos XBee de comunicação sem fio, chamado de modo API.



Figura 5.14: Fluxograma de execução do protocolo de comunicação criado entre os elementos de hardware e software.

Fonte: (SILVA et al., 2017)

A topologia de rede idealizada foi em estrela, com comunicação unidirecional do módulo instalado em campo com o módulo receptor. Em caso de mais módulos em operação, os atributos de endereço diferenciam as informações, que podem ser compiladas em software dedicado e customizado, em tempo real, para medição de umidade de minério.

# 5.2. Preparação do minério

Nesta subseção é descrita a metodologia adotada para manuseio e preparação do material mineral recebido como doação.

O produto resultante da planta de beneficiamento visitada é o *pellet feed standard*. A mineradora também possui internamente uma planta de pelotização, e dela são produzidas, com a utilização desse produto, pelotas *standard*. Essa terminologia *standard* é utilizada para designar que o material produzido na mineradora não é considerado de alto teor de ferro (algo em torno de 60% de Fe). A matéria prima que alimenta todo o processo chega na usina de beneficiamento a um teor aproximadamente 40%, em seu estado natural após o desmonte. A região possui grandes reservas de itabiritos compactos que possuem a característica de baixo teor de ferro. A magnitude da usina e de sua capacidade de processamento de material a faz receber matéria prima de três minas de exploração, concomitantemente.

## 5.2.1. Secagem da polpa

As amostras de concentrado e de rejeito do circuito de flotação foram coletadas e armazenadas em estado físico de polpa de minério. Para que o minério processado percorra longas distâncias durante seu processo de beneficiamento e concentração, existe um circuito de minerodutos que escoam essa polpa: parte para o carregamento e despache para exportação e parte para uma planta de pelotização adjacente à usina.

As amostras foram coletadas em tambores metálicos, como o exemplar exibido na Figura 5.15a, sendo cada tambor preenchido em sua total capacidade para transporte (200L). O guindaste hidráulico do caminhão munck carregou as amostras e elas foram trazidas para o campus da UFOP. Após um período de decantação das polpas, tanto de rejeito quanto de concentrado, foram abertos os tambores e a fase líquida de água livre das amostras foi facilmente removida. Após retiradas dos recipientes, foram espalhadas em uma fina camada na maior área possível disponível, respeitando os limites de duas lonas de aproximadamente 9  $m^2$  cada uma. A quantidade de material após a retirada da água diminuiu drasticamente, podendo ser visto seu conteúdo final representado na Figura 5.15b.



Figura 5.15: Secagem das amostras de minério de ferro: (a) tambor metálico com lacre para transporte das amostras até a UFOP; (b) secagem a céu aberto em lonas plásticas.

Foram gastas 72 h para a secagem, com o clima favorável e areação do material a cada 12 h, devido a grande quantidade. Com 24 h decorridas de procedimento, foi feito um teste para averiguação da umidade presente no concentrado. O resultado encontrado desse teste rápido, executado com uma amostra aleatória retirada do lote, foi de 9,73% considerando a umidade em base úmida.

A quantidade mássica de minério de ferro foi aferida com uma balança industrial, e os valores encontrados foram:

- 244,1 kg de concentrado da flotação;
- 238,3 kg de rejeito da flotação.

### 5.2.2. Amostragem

Para a retirada de uma quantidade de massa expressiva dos tipos de minério foi adotado um procedimento de homogenização e quarteamento, aplicável em amostras manuseáveis: a técnica de pilha cônica. A retirada das amostras da mineradora em tambores gerou a amostra primária para este trabalho, proveniente do universo amostral da usina, que possui um fluxo contínuo de produção. O controle de vazão da polpa nos dois pontos de amostragem era feito por válvulas manuais tipo esferas com volante. A etapa seguinte de preparação foi descrita na Seção 5.2, fazendo-se necessário, portanto, avançar para a etapa de homogenização e quarteamento desse montante primário adquirido, antes da amostragem final a ser analisada.

Foi executada, portanto, a homogenização de toda a massa de minério, em lonas separadas. A utilização de alguns EPI's foram fundamentais, como máscaras por exemplo, pois a granulometria real do material mineral em questão é muito fina, motivado pela necessidade da maioria das plantas hoje de se beneficiar o minério de ferro a úmido. Os procedimentos em cada lona demoraram cerca de 100 minutos, com a utilização de enxadas, pás e rastelos. Cada montante foi espalhado e em seguida reacumulado no centro oito vezes. Na Figura 5.16 é apresentada a execução da homogenização dos dois tipos de minério em lona, para o manuseio de toda a massa de cada tipo de minério.



Figura 5.16: Procedimento de homogenização em lona Sider.

A lona especial evidenciada na Figura 5.16 possui geometria quadrada com 3 m de lado. Após misturada e distribuída por sua superfície, de modo a aproveitar ao máximo os espaços disponíveis, foram levantados os vértices alternadamente até que todo um quadrante fosse deslocado para o centro da lona. Em cada passada, o material espalhado é depositado sempre no topo da pilha, até que esta, após algumas repetições dessa atividade, é considerada homogênea. Uma representação esquemática do procedimento descrito é mostrada na Figura 5.17.


Figura 5.17: Etapas para a construção da pilha cônica, que antecede o quarteamento: (1), (2), (3) e (4) demonstram a ordem de uma rodada de manipulação da lona.

Dada a homogenização, a operação de quarteamento em pilhas cônicas que a sucedeu baseia-se na divisão do montante mineral para sua efetiva redução mássica e volumétrica em alíquotas, que em seguida foram entregues ao laboratório especializado em análises físicoquímicas de minerais.

Com os cones elaborados no centro da lona, o topo dos cones foi achatado e o material foi dividido em quatro porções iguais com o auxílio de outro instrumento chamado cruzeta. Com as quatro alíquotas resultantes e de maneira arbitrária, foram numeradas seguindo uma sequência lógica cada uma das alíquotas e, a partir dessa divisão, foram unidas duas alíquotas quaisquer que se opuseram: esse par foi escolhido para a a continuação do procedimento até a redução necessária para análise informada pelo laboratório (aproximadamente 5kg). O restante do material, ou seja, os outros dois quadrantes foram "descartados". Com a quantidade de massa manuseada, esse procedimento foi executado seis vezes para cada tipo de minério. A Figura 5.18 sintetiza esse procedimento.



Figura 5.18: Etapas para quarteamento da pilha cônica até a redução almejada de quantidade de material.

Fonte: adaptado de Sampaio et al. (2007)

Foram ensacadas as amostras finais e enviadas ao laboratório. Os resultados das análises podem ser observados no Anexo A.

## 5.2.3. Preparação das amostras minerais úmidas

Esta subseção aborda as duas metodologias adotadas para realização dos ensaios que envolveram minério: os Experimentos III e IV. A motivação da execução de duas estratégias baseou-se na diferença mássica entre as amostras necessárias para abastecer cada experimento.

Para o experimento de calibração e validação estática (Experimento III), a massa de minério selecionada foi de 13 kg por amostra, enquanto a massa para o experimentos no silo (Experimento IV) foram executadas com aproximadamente 60 kg de minério.

As amostras do Experimento III produzidas para a primeira rodada de ensaios com minério de ferro foram manuseadas nas dependências do laboratório de conforto ambiental, que conta com um ambiente climatizado em termos de temperatura e umidade relativa. A temperatura durante todos os procedimentos foi mantida à 20° C e o desumidificador, a partir do dia que os procedimentos de confecção dessas amostras se iniciaram, manteve-se ligado 24 h por dia.

A definição da massa de teste para o Experimento III foi baseada em dois argumentos. O primeiro foi a geometria da descarga da miniatura de silo construída, e o segundo, o da densidade aparente das amostras (Anexo A). Com a definição de um volume finito e de um valor de densidade aparente do material manipulado, foi possível estimar uma quantidade que satisfizesse a todos os patamares de umidade requeridos, considerando que o volume do minério, analisado na faixa de variação de completamente seco até a saturação capilar da amostra, diminui.

Dessa forma, em posse do valor de 2,56 g/cm<sup>3</sup> referente à análise do concentrado de minério de ferro, foi construída uma caixa prismática que simula o volume e o formato geométrico da descarga do silo. O material selecionado para a confecção das faces foi o PEAD. A espessura das chapas para confecção das faces foi de 5 mm, garantindo um fator de ductilidade adequado à aplicação, ao mesmo tempo que fornecia também uma baixa dureza, que facilitava as adaptações para a confecção posterior das duas montagens de transdutor capacitivo. O resultado final da caixa de PEAD está ilustrado na Figura 5.2.3. A fixação das faces foi feita por meio de parafusos auto-perfurantes de ponta agulha, com aproximadamente 2 mm de diâmetro.



Figura 5.19: Caixa de PEAD para ensaios estáticos.

O diâmetro interno buscou seguir as medidas da réplica do silo, e atingiu os valores de 12,3 cm de aresta da base quadrada do prisma e 30,0 cm de altura. O volume interno, portanto, configurou-se em 4538,7 cm<sup>3</sup>, o que, com base no valor de densidade aparente mencionado, demandou uma massa de concentrado de minério de ferro de aproximadamente 11619,07 g para preenchimento total da caixa. Assim, foi estimada uma margem de massa extra que serviria para as diferentes compactações e níveis de umidade das amostras. Foi adicionada uma margem mássica ao valor encontrado, elevando a massa de cada amostra produzida para 13 kg, que equivale a um percentual pouco maior que 10% da massa mineral calculada.

Para esse valor de massa seca de minério, os valores de massa de água destilada para produção de amostras foi calculados baseados na equação da umidade em base úmida.

A massa de minério de cada amostra foi subdivida em cinco partes, para que o ato de homogenização propriamente dito fosse executado com mais eficiência, visto que todos os casos apresentados nessa subseção foram feitos manualmente. As ferramentas manuais utilizadas nessa etapa foram apenas duas pás, uma achatada e outra parcialmente cilíndrica. Com a massa seca de 2,6 kg de concentrado de minério, portanto, misturava-se um quinto da massa de água calculada, ambas as massas mensuradas na balança de precisão semi-analítica do LABCAM, modelo BL3200H. O passo a passo metodológico adotado na preparação das amostras é ilustrado na Figura 5.20.



Figura 5.20: Sequências de operações de homogenização das amostras utilizadas para calibração:(a) separação sublote mineral; (b)inserção de água destilada; (c) absorção imediata da água pela amostra; (d) soterramento da água com minério seco; (e) repartição do sublote úmido em blocos menores; (f) repartição manual máxima em cada sublote mineral úmido; (g), (h), (i) e (j) homogenização secundária da amostra no saco plástico.

Na Figura 5.20(a) observa-se a massa seca de 2600,0 g de minério separada; na Fi-

gura 5.20(b) e (c) a massa de água referente a um quinto do que foi calculado para aquela amostra era pesado e inserido, começando a ser absorvido imediatamente pela massa seca; na Figura 5.20(d) observa-se que enquanto a água aplicada era absorvida, a massa seca de minério ao redor foi carregada para o mesmo lugar onde a água estava depositada; na Figura 5.20(e) o bolo mineral formado era repartido mecanicamente em aglomerados menores; na Figura 5.20(f) a repartição continuava até que o tamanho dos aglomerados de minério existentes ficassem irrepartíveis, conforme ilustrado; na Figura 5.20(g), (h), (i) e (j), todo o material manipulado para cada quinto da amostra era depositado em um mesmo saco plástico (espessura de 0,2 mm), sendo este lacrado e amassado várias vezes até que todas as partes se misturassem em seu interior, conferindo uma segunda homogenização para as amostras de cada patamar de umidade.

As amostras produzidas para o Experimento IV, foram executadas nas dependências do LABCAM e em suas imediações. Apenas a primeira confecção de amostras minerais, tratandose da calibração estática do sistema construído, partiu de um lote de minério considerado completamente seco (24h em estufa à 100°C). As amostras subsequentes foram confeccionadas sob a premissa de que a massa de minério resultante, após a confecção da amostra inicial e execução das medições do sistema já instalado no silo, foi homogenizada idealmente. Feita essa consideração, encontrou-se uma razão para as três amostras feitas a posteriori, correlacionando quantidade de massa de água destilada que supostamente estaria presente em cada grama da mistura de minério com a água, originado da primeira mistura executada. A partir desse raciocínio, era apenas acrescentada a água restante para que os valores calculados fossem teoricamente alcançados. A mesma massa mineral então foi usada para obtenção das quatro amostras utilizadas no Experimento IV, sendo homogenizada para novos patamares de umidade sucessivamente.

Na Figura 5.21, é apresentado o detalhe operacional do procedimento incremental das partes de água destilada no minério em movimento de homogenização. O equipamento utilizado nesse procedimento foi uma betoneira de 80 L.



Figura 5.21: Aplicação de incrementos de água durante homogenização das amostras do Experimento IV.

Como pode ser observado na Figura 5.21 foi acoplado, no bocal de carregamento e descarga do equipamento, um plástico de mesma espessura dos anteriormente descritos, como forma de selar o ambiente interno de homogenização da betoneira do ambiente externo, exceto por um pequeno furo central no plástico, de aproximadamente 0,5 cm de diâmetro. Através desse furo foi posicionada uma pisseta de plástico graduada com bico curvo. Foi aplicada água destilada nas amostras no interior da betoneira durante cinco minutos aproximadamente, para cada recipiente cheio (500 ml) e proporcionalmente menos tempo para porções menores de água. É possível perceber que os incrementos foram, de fato, adicionados concomitantemente à ação de giro da betoneira para homogenização.

As massas de minério seco (primeira amostra) e da mistura de minério e água foram pesadas com balança digital convencional antes de serem homogenizadas (apenas para a primeira amostra), depois de serem utilizadas no silo e depois de serem homogenizadas. As perdas na homogenização e transporte, bem como no próprio procedimento experimental, foram reduzidas com a execução de duas pesagens por amostra. De maneira esquemática, na Figura 5.22, um resumo ilustrativo da preparação das amostras do silo é apresentado, do montante total de minério ou mistura de minério com água que o procedimento se inicia, até a retirada das amostras de verificação de umidade real.



Figura 5.22: Representação esquemática da elaboração de cada amostra destinada ao Experimento IV.

Foi adotado um critério de subdivisão do montante tomado como montante total amostral em dois sublotes, sendo cada lote homogenizado na betoneira separadamente durante dez minutos após a inserção completa de massa de água destilada destinada àquela subdivisão. Ao fim da homogenização de cada sublote e retiradas as alíquotas de verificação de umidade, ambos os sub lotes de minério eram recolocados na betoneira e homogenizados conjuntamente, por mais dez minutos.

As duas metodologias adotadas de preparação das amostras buscaram reproduzir as mesmas executadas em tratamento de minérios, em que os impactos promovidos por este projeto, além de agregar a essa área, se tornam indicadores para a seleção de metologia de manipulação de minério de ferro em projetos futuros.

# 5.3. Experimentos

A metodologia para os experimentos foi executada em quatro etapas, enumeradas por sua ordem cronológica de execução: I, II, III e IV. A apresentação é feita, portanto, em subseções compatíveis com a apresentação dos resultados deste trabalho, que seguiram a mesma sequência lógica.

Para todas as utilizações do LCR nos experimentos, foi configurado o modo de medição em "capacitância paralela", adequado para aferições nas escalas esperadas de medição anteriormente apresentadas na Tabela 5.2.

Para cada configuração de teste que utilizou o LCR, foram aferidas 40 indicações intercaladas do mesmo intervalo de tempo, contemplando o valor da capacitância e o valor do fator de dissipação associado. Já para as medições feitas com a PCI construída, foram executadas 1000 indicações por ponto de medição. A diferença construtiva das montagens influencia os fatores de dissipação, quando compara-se com as montagens comercialmente disponíveis. Um encapsulamento cerâmico ou de tântalo *vs* montagem manual com PEAD e adesivo líquido instantâneo, por exemplo, afeta diretamente a componente real resistiva da impedância. A dissipação, portanto, foi quantificada de forma precisa nos resultados posteriormente apresentados.

Os experimentos II e III foram executados com a caixa de PEAD na posição vertical, para simular a mesma influência da gravidade apresentada no silo.

## 5.3.1. Experimento I

O primeiro experimento buscou caracterizar a influência do PEAD de revestimento final da face sensora sobre a medida capacitiva. Assim como o modelo clássico de capacitância para placas paralelas, a influência das espessuras de materiais dielétricos no atravessamento do campo elétrico gerado, interfere diretamente na capacitância produzida, bem como na resolução do sistema de medição capacitivo que utiliza dessa variação para o monitoramento de mudanças físicas no material dielétrico. A análise baseia-se na proporção de material dielétrico na região de sensoriamento (definida pelo alcance de profundidade T do campo elétrico e pelo comprimento l dos eletrodos capacitivos) capaz de variar, e aquela que, praticamente, não varia e pode ser considerada fixa. A configuração de medição não invasiva exige da montagem um revestimento dos eletrodos, e para ambas as montagens realizadas nesse trabalho, foram utilizadas placas de PEAD de 1 mm de espessura para materializar esse revestimento (Figura 5.11).

As medições, portanto, consistiram em medir a vazio as montagens 1 e 2, com e sem o revestimento de PEAD, por meio do LCR, alternando entre as frequências de medição de 100 e 200 kHz. Na Figura 5.23 é apresentada a montagem 2 antes do revestimento de PEAD.



Figura 5.23: Face sensora da montagem 2, sem revestimento de PEAD.

## 5.3.2. Experimento II

No segundo experimento, os materiais dielétricos utilizados foram a água destilada e o ar. A troca de sistema de medição para cada lote de água destilada inserido, ora o LCR, ora a PCI, foi feita do início ao fim do procedimento para cada uma das montagens 1 e 2. O motivo dessa necessidade se deu pela influência da PCI nas medidas capacitivas, mesmo depois

de uma tentativa de inserção de um "*by-pass* físico"(*jumper*) nas resistências que compõem o circuito oscilador. Ao se constatar a permanência da influência nas medidas capacitivas aferidas pelo LCR, e em função de preservar a PCI de uma segunda intrusão de *by-pass*, foi adotado o procedimento inicialmente descrito.

A vedação das frestas e arestas foi feita com cola silicone a frio, interna e externamente à caixa que simulou o reservatório do silo, bem como no encaixe da montagem do transdutor propriamente dita. Certificando-se de que a contenção de vazamentos foi alcançada, os experimentos foram realizados. A caixa, em seu último ponto de medição para as duas montagens, ficou perto da condição de completamente cheia, porém não alcançou esse estado de preenchimento. A quantidade de lotes de água foi suficiente para a finalidade desse experimento, de verificação de linearidade na resposta dos transdutores construídos e estimativa de possíveis cenários de resolução para o Experimento III.

Na Figura 5.24 são apresentadas as conexões da ponta de prova do LCR nas duas montagens vedadas, em (a) e (b), respectivamente. É exibido também o momento de inserção dos lotes de água destilada, em (b) e (d), através de pequenos furos feitos na parte superior da caixa.



Figura 5.24: (a) e (b) representam a medição com LCR nas duas montagens construídas e em (c) e (d) pode-se observar como foram inseridas as inserções dos lotes de água destilada.

O modo de execução do procedimento fez com que o sistema de medição, paralelamente, fosse calibrado para se comportar como um sistema de medição de nível de fluidos heterogêneos (ar + água). Não é possível afirmar que o sistema de medição mediria qualquer combinação de materiais nesta configuração, pois neste caso específico a diferença entre constantes dielétricas do ar e da água foi grande.

## 5.3.3. Experimento III

No terceiro experimento, amostras minerais úmidas foram utilizadas para execução da calibração do sistema construído, para as montagens 1 e 2. Todos os procedimentos nessa etapa utilizaram a caixa de PEAD como recipiente para as amostras, e as medições com LCR e a PCI ocorreram também de forma alternada, aproveitando o mesmo posicionamento das montagens dos transdutores sob as amostras dentro da caixa.

O procedimento experimental foi similar ao realizado com água destilada. A principal diferença foi o critério de compactação aplicado. Sabe-se que a compactação das amostras de solo ou minério influenciam diretamente na medição de umidades quando utiliza-se o princípio de funcionamento capacitivo. Por isso, na tentativa de minimizar esse efeito em todas as medições, foi adotado um critério de máxima compactação manual. Foi utilizado um martelo como ferramenta de compressão, sequenciando o preenchimento e compactação do volume do minério inserido na caixa em cinco inserções, de forma a produzir um nível de compactação mais próximo do homogêneo quanto possível. Após a quinta inserção, uma raspagem era feita na superfície da amostra na qual as montagens se apoiariam, evitando assim a formação de espaços vazios que comprometem o valor de capacitância produzida pelo elemento sensor. As montagens eram então posicionadas e fixadas com abraçadeiras de plástico, em pelo menos quatro regiões distintas ao longo do comprimento das montagens. As laterais das montagens 1 e 2 se apoiavam na arestas de abertura da caixa de PEAD, configurando às abraçadeiras uma função de imobilização das montagens sob as amostras.

Antes da inserção das amostras na caixa foram retiradas as alíquotas de verificação de umidade. Por meio de um procedimento de quarteamento em menor escala do que o executado no início de preparação do minério, cada amostra foi dividida pequenas porções que compuseram a alíquota final de verificação, sendo executado o método padrão de estufa para comprovação real da umidade do minério, conforme exibido na Figura 5.25.



Figura 5.25: Alíquotas de verificação retiradas dos lotes amostrais de pellet feed utilizados para calibrar as montagens.

Dessa forma, a calibração e validação das montagens elaboradas foram feitas, escolhendo a Montagem 2 para dar prosseguimento ao Experimento IV no silo em escala reduzida.

## 5.3.4. Experimento IV

O quarto experimento consistiu em testar a montagem 2, escolhida após calibração e validação do sistema na caixa de PEAD, para medir a umidade do minério em movimento no silo. A dinâmica do experimento consistiu no arraste do material por meio da mesma lona utilizada para os procedimentos de preparação do minério, porém em formato adequado. Na

Figura 5.26 são mostrados diferentes momentos da execução do experimento para representação da metodologia adotada.



Figura 5.26: Execução do procedimento experimental IV. Em (a) observa-se os componentes de teste para realização do experimento; (b) a visão frontal do arranjo experimental; (c) foca o detalhe de instalação da Montagem 2 do transdutor no equipamento; e (d) a execução do teste.

Após homogenizadas as amostras, conforme explicitado na Seção 5.2, elas eram trazidas em dois sacos fechados para o laboratório, repesadas para quantificar a massa real que restou após homogenização na betoneira e, então, inseridas dentro da miniatura de silo. A compactação pela inserção foi feita de maneira espontânea para que não influenciasse no escoamento do minério. A compactação forçada ajudaria na estabilização das medições feitas no silo, conforme os resultados obtidos com o experimento III, porém afetariam a dinâmica do procedimento no experimento IV. Como medida corretiva, em alguns momentos do experimento foram utilizadas as próprias ferramentas de manuseio do minério para auxilio do escoamento, respeitando a fronteira da região de descarga do silo que coincide com a região de sensoriamento do transdutor capacitivo. Caso o nível de minério na tremonha do silo não se alterasse conforme o escoamento na descarga, a ação corretiva era executada.

Para início do experimento com cada amostra confeccionada, antes de começar os registros com o sistema de medição, o arraste manual da esteira era iniciado primeiro, buscando criar um regime de operação constante para, então, efetuar as medições. O escoamento da quantidade de minério, que teve massa total em torno de 60 kg, foi alinhada com a quantidade de indicações desejada por umidade analisada, sendo esta igual à um mil indicações. O tempo decorrido para as indicações foi o mesmo do experimento III, durando aproximadamente 5 minutos cada amostra. Portanto, a maior parte da massa inserida era escoada durante esse período, sem que a descarga do silo ficasse vazia em nenhum instante.

As alíquotas de verificação foram retiradas logo depois da homogenização de cada sub lote de minério, que possuíam aproximadamente metade da massa total amostral, para posterior encaminhamento desse material ao laboratório de teste.

Com a mesma amostra, após o procedimento, a massa era pesada novamente e o novo cálculo de massa de água a ser inserida, para um novo patamar de umidade, era realizado

(Seção 5.2). Por fim, após a coleta das indicações para as quatro amostras elaboradas, iniciou-se a análise dos resultados.

## 6. Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios realizados em laboratório, descritos no Capítulo 5. Por meio da análise estatística das indicações de cada conjunto de pontos, é observada uma resposta linear do sensor em todos os casos.

A umidade das amostras medida por meio do método padrão de estufa foi comparada à umidade desejada depois do procedimento de homogenização do minério, com a finalidade de validar as metodologias adotadas.

Os procedimentos executados em laboratório que compõem essencialmente este trabalho são seccionados em grupos, em que os experimentos tiveram a seguinte ordem cronológica de execução:

- (i) Ensaio de verificação da capacitância fixa produzida pelo revestimento de PEAD na face sensora das duas montagens;
- (ii) Ensaio de consolidação de linearidade da resposta do transdutor com água destilada, aferindo a capacitância concomitantemente ao sinal de saída do sistema;
- (iii) Calibração estática do transdutor capacitivo utilizando amostras de minério de ferro do tipo *pellet feed standard*;
- (iv) Teste on-line do transdutor em um silo construído em escala reduzida para simular condições industriais.

# 6.1. Amostras para uso na calibração estática

Esta seção é dedicada à apresentação dos resultados de verificação da umidade, com base no procedimento de pesagem e secagem em estufa para aferição da umidade real (valor verdadeiro convencional) das amostras minerais.

Para a calibração usando as amostras de concentrado de minério de ferro, foram feitas as consideração apresentadas na Tabela 6.1. A priori, foram calculadas as razões para 13 kg de massa seca ( $M_s$ ) de concentrado com a respectiva proporção de massa de água ( $M_a$ ) a ser incrementada e homogenizada. As massas das alíquotas de verificação ( $AV_a \ e \ AV_d$ ) foram medidas usando balança de precisão antes e depois de permanecerem na estufa a 105°C por 24 horas , respectivamente, e a massa real de água foi de fato medida ( $M_{a-real}$ ). O cálculo da umidade real ( $U_{real}$ ) de cada amostra foi realizado por meio da Equação 2.16, tendo como objetivo a umidade desejada ( $U_d$ ). Desse modo, determina-se, portanto, o valor de umidade real de cada amostra.

$U_d$	$U_{real}$	$M_s$	$M_a$	$AV_a$	$AV_d$	$M_{a-real}$
(%)	(%)	(kg)	(kg)	( <b>g</b> )	<b>(g</b> )	( <b>g</b> )
2	1,72	13	0,27	180,49	177,38	3,11
4	3,81	13	0,54	135,03	129,88	5,15
6	5,71	13	0,83	149,53	140,99	8,54
8	7,57	13	1,13	179,09	165,53	13,56
10	9,41	13	1,44	135,38	122,64	12,74
12	9,89	13	1,77	91,31	82,28	9,03

Tabela 6.1: Comparação entre a umidade desejada  $(U_d)$  e a umidade real  $(U_{real})$ .

Para a análise de desempenho de preparação das amostras úmidas, objetivando aproximarse ao máximo do valor teórico calculado para os 13 kg de massa seca de concentrado, a Figura 6.1 foi elaborada. Nela está correlacionado o valor desejado de cada amostra homogenizada com a umidade real alcançada efetivamente. Uma relação de 97,5% pode ser observada com a metodologia desenvolvida para homogenização dessas amostras.



Figura 6.1: Relação entre umidade desejada e umidade real das amostras de concentrado usadas durante a calibração do transdutor.

# 6.2. Amostras para teste no silo

Para os procedimentos experimentais no silo, a estratégia metodológica foi diferente. Assim, o grau de assertividade na preparação e homogenização das amostras minerais também se diferenciou do procedimento executado a priori. Na Tabela 6.2 são apresentadas as relações utilizadas de massa de água e massa de sólidos, bem como o percentual de umidade resultante para as amostras que escoaram pelo silo. Conforme pode ser observado na Tabela 6.2, a média aritmética entre os dois valores determinados de umidade real em base úmida, relacionado a um mesmo valor de umidade de referência, teve um efeito balizante e trouxe o valor de umidade considerado mais próximo do que o procedimento de homogenização efetivamente conseguiu produzir. A utilização da média aritmética calculada entre a umidade das duas alíquotas de verificação foi considerada pois, no caso hipotético da umidade real ser tomada por meio de uma alíquota única de verificação, e essa alíquota fosse exatamente a mesma ( $M_a \, e \, M_s$ ) que as duas que foram analisadas, as diferenças absolutas de massa (antes e depois de 24h na estufa), seriam iguais. Portanto  $M_{a-real}$  representa a massa de água de fato inserida em cada lote amostral e  $U_c$  foi a umidade média considerada para estabelecer a análise qualitativa.

, d	,	1	$\Lambda_{a-}$	roal	1	Ja	U	real	$U_c$	
u )			(g	)	(	%)	(	%)	(%)	
,3	37		4,0	0		3	3	,35	201	
05	5		2,2	.5		3	2	,34	2,04	
,4	17		5,0	3		5	4	,72	1 20	
,1	16		5,4	.4		5	5	,06	4,09	
,0	)8		7,5	8		7	5	,59	5 5 1	
,8	35		7,6	5		7	5	,48	5,54	
,1	12		7,5	3		9	6	,57	7 14	
,6	52		11,	76		9	7	,72	7,14	•

 Tabela 6.2: Características de massa de sólidos, massa de água das alíquotas e cápsulas de verificação

Como pode ser observado na Figura 6.2, nesse procedimento houve uma relação de umidade real com umidade desejada consideravelmente menor que o anterior. Essa diminuição ocorreu devido à diferença do método de homogenização e aplicação da massa de água sob a massa de sólidos, a quantidade expressivamente maior de massa de sólidos utilizada e as perdas no processo de homogenização e transporte das amostras para o teste no silo. Houve um decréscimo de aproximadamente 6,7% na relação supracitada, atingindo os 91,0%.



Figura 6.2: Relação entre umidade requerida e umidade alcançada, nas amostras de concentrado para teste do transdutor no silo.

# 6.3. Experimentos

Nesta seção são apresentados e analisados os quatro experimentos citados e enumerados no início deste Capítulo.

## 6.3.1. Experimento I — Capacitância fixa do sensor

Nesta subseção é realizada uma comparação entre as capacitâncias apresentadas por ambas as montagens (com e sem o revestimento dos eletrodos por PEAD) com o sensor a vazio, ou seja, sem influência de nenhum material como dielétrico a não ser o próprio ar. Conforme detalhado na Subseção 2.1.3, durante a fixação das peças nas montagens, houve interesse em verificar o efeito que a camada de PEAD na face sensora exerce no sinal do transdutor capacitivo. A avaliação dessa influência, portanto, indicaria se a escolha da espessura de revestimento e proteção dos eletrodos seria suficientemente baixa e não diminuiria a sensibilidade do equipamento.

Como será observado, houveram evidências ao longo dos quatro experimentos que a capacitância do sensor a vazio, medida pelo LCR, apresenta valor diferente para cada frequência de excitação do equipamento (100 e 200 kHz). A razão desse efeito pode estar relacionado à não idealidade do sensor capacitivo, ou seja, está associada à fatores construtivos das duas montagens, principalmente relacionados às propriedades resistivas e indutivas dos materiais utilizados, que não foram levadas em consideração nos experimentos. Portanto, as medições se tornaram distintas para diferentes frequências, mas não perderam sua característica linear proporcional à constante dielétrica do material sob teste.

#### Montagem 1

Como era esperado, devido ao aumento da constante dielétrica equivalente que a combinação de uma camada de PEAD e outra de ar produzem, a influência da inserção do revestimento de PEAD na face sensora aumentou o valor de capacitância do transdutor a vazio na montagem 1. Conforme pode ser observado na Figura 6.3, os patamares de capacitância se distinguiram de maneira nítida em ambas as frequências de leitura do LCR.



Figura 6.3: Valores de capacitância da montagem 1: sem (a) e com (b) revestimento de PEAD na face sensora, medidos a 100kHz e 200kHz.

Os valores encontrados após o procedimento de verificação, antes e depois da instalação definitiva do revestimento de PEAD na face sensora do transdutor estão apresentados na Tabela 6.3. Como pode ser diagnosticado por meio da comparação entre os fatores de dissipação encontrados, o aproveitamento da energia aplicada ao sensor capacitivo foi maior com a adição do revestimento, isto é, uma porcentagem menor dessa energia foi dissipada pela resistência interna inerente ao capacitor desenvolvido. Essa dissipação, medida pelo LCR a uma frequência de 100 kHz, alcançou um valor quase 6 vezes menor, enquanto à 200 kHz, alcançou pouco mais de 4 vezes menos do que a medição sem PEAD.

	Sem	PEAD	Com PEAD		
	Capacitância	Fator de	Capacitância	Fator de	
	[ <b>pF</b> ]	dissipação	[ <b>pF</b> ]	dissipação	
100 kHz	$16{,}30\pm0{,}19$	$0,5288 \pm 0,0138$	$166, 16 \pm 0, 67$	$0,0935 \pm 0,0034$	
200 kHz	$14,\!35\pm0,\!11$	$0,2241 \pm 0,0080$	$182,56 \pm 0,13$	$0,0531 \pm 0,0008$	

Tabela 6.3: Influência do revestimento de PEAD na face sensora para a montagem 1

Para a determinação da incerteza, foi calculada uma faixa baseada no desvio padrão de 40 medições realizadas para a montagem com e sem o revestimento de PEAD na face sensora, sob condições de repetibilidade. Para a seleção do coeficiente de Student que multiplica o valor de desvio padrão amostral e define a largura dessa faixa, considerando n = 40, utilizou-se t = 2,021. A incerteza para essas medições foi feita, portanto, dentro da faixa na qual se espera o erro aleatório a 95% de probabilidade.

#### Montagem 2

De maneira análoga, a mesma metodologia foi emprega à montagem 2 e esperou-se o mesmo comportamento do transdutor, com diferenças apenas escalares com relação à faixa de capacitância medida. As faixas capacitivas estão apresentadas na Figura 6.4.

Os patamares de capacitância dessa montagem também distinguiram-se de maneira nítida. A diferença capacitiva entre a montagem com e sem PEAD teve uma faixa menor de valores. Nessa montagem, antes da execução do procedimento de se medir a capacitância do sensor a vazio e sem o revestimento da face sensora, houve uma inserção prévia de recortes de PEAD para completar o espaço entre as chapas de cobre, até que a montagem fosse nivelada à face sensora dos eletrodos (vide Figura 5.12, Subseção 5.1.4). Desse modo, como o PEAD oferece uma constante dielétrica maior que a do ar, a capacitância fixa sem revestimento obteve uma medição relativamente maior, por causa da ação construtiva de nivelamento com PEAD. Consequentemente, ocasionou-se uma redução entre a diferença capacitiva em relação às medições com o revestimento da face sensora, apresentadas na Figura 6.4(a) e (b) para 100 kHz e 200 kHz, respectivamente. Na faixa de medição de 200 kHz do LCR, entretanto, percebese uma maior resolução de valores do que 100 kHz. A capacitância elevou-se para ambas as frequências aplicadas. As incertezas de medições são apresentadas na Tabela 6.4.

	Sem	PEAD	Com PEAD		
	Capacitância	Fator de	Capacitância	Fator de	
	[ <b>pF</b> ]	dissipação	[ <b>pF</b> ]	dissipação	
100 kHz	$1,021 \pm 0,003$	$0,0417 \pm 0,0044$	$1,\!224\pm0,\!008$	$0,1872 \pm 0,0209$	
200 kHz	$1,565 \pm 0,054$	$0,0588 \pm 0,0097$	$2,011 \pm 0,004$	$0,0322 \pm 0,0021$	

Tabela 6.4: Influência do revestimento de PEAD na face sensora para a montagem 2



Figura 6.4: Valores de capacitância das montagem 2: sem (a) e com (b) revestimento de PEAD na face sensora, medidos a 100 kHz e 200 kHz.

O PEAD, que possui a constante dielétrica relativa entre 2, 2 - 2, 4, aumentou em todos os casos o valor de capacitância produzida pelo par de eletrodos de cobre, comparado às medições apenas com ar. O fato de a constante dielétrica do ar ser aproximadamente 1 fez com que a constante dielétrica resultante ou equivalente da combinação de uma camada finita de PEAD na região de sensoriamento aumentar e, portanto, aumentar a capacitância final do transdutor para as duas montagens.

## 6.3.2. Experimento II — Comportamento com água destilada e ar

Assim como detalhado no Capítulo 5, após a etapa de determinação da capacitância fixa de ambas as montagens se fez necessário verificar a resposta do instrumento, mediante a alteração do material dielétrico ao redor capacitor coplanar, usando substâncias com constante dielétrica conhecidas. Dessa forma, foram realizados mais dois experimentos com água destilada e ar, novamente de maneira comparativa, antes dos testes inciais com amostras minerais. A execução baseou-se em variar a proporção de dois materiais dielétricos (água destilada e ar) dentro da região sensível do arranjo de eletrodos.

Os resultados de capacitância para o Experimento II foram avaliados pelo LCR sob a frequência de medição do equipamento de 200 kHz e apresentados nas subseções seguintes.

#### Montagem 1

Para a montagem 1 durante o experimento com água, as medições foram realizadas tanto com o LCR quanto com o transdutor desenvolvido neste trabalho. Os resultados coletados para a mesma quantidade de massa de água destilada foram realizados em sequência. Na Figura 6.5 pode ser observado o resultado gráfico das medições realizadas.



Figura 6.5: Comportamento dos valores médios de capacitância da montagem 1: Em (a), valores aferidos com LCR e em (b), valores indicados pelo transdutor capacitivo.

O comportamento do sistema teve resposta linear à medida que a constante dielétrica aumentou. À medida que as porções de água destilada foram tomando o espaço ocupado pelo ar, os valores aumentaram linearmente a partir da medição a vazio apenas com o revestimento de

M <sub>a</sub>	Capcitância	Fator de	Timer 555
<b>(g)</b>	( <b>pF</b> )	Dissipação	( <b>0,2us</b> )
$0,00 \pm 0,01$	$182,56 \pm 0,13$	$0,0531 \pm 0,0008$	$4063\pm0$
$500,86 \pm 0,01$	$198,\!43 \pm 0,\!33$	$0,1407 \pm 0,0011$	$4167 \pm 2$
980,39 ± 0,01	$203,09 \pm 0,34$	$0,1329 \pm 0,0014$	$4287\pm 6$
$1459,31 \pm 0,01$	$208,44 \pm 0,24$	$0,1419 \pm 0,0013$	$4392 \pm 12$
$1927,10 \pm 0,01$	$212,\!61\pm0,\!34$	$0,119 \pm 0,0012$	$4415\pm25$
$2395,12 \pm 0,01$	$216,83 \pm 0,3$	$0,111 \pm 0,0025$	$4535 \pm 18$
$2861,22 \pm 0,01$	$220,94 \pm 0,25$	$0,1078 \pm 0,0039$	$4616 \pm 16$
3329,79 ± 0,01	$230,12 \pm 0,4$	$0,1399 \pm 0,0049$	$4655\pm 6$
3788,61 ± 0,01	$234,7 \pm 0,35$	$0,1418 \pm 0,005$	$4681 \pm 39$
4257,41 ± 0,01	$238,62 \pm 0,74$	$0,126 \pm 0,0016$	$4840 \pm 16$

Tabela 6.5: Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor capacitivo da montagem 1

PEAD. A Tabela 6.5 apresenta os valores mensurados e suas respectivas incertezas associadas às medidas.

A análise preliminar que pode ser estabelecida com base nesses resultados, tanto para a montagem 1 quanto para a 2, é de que a quantidade de pontos produzidos pelas medições do sistema, ao variar-se o material dielétrico entre o ar e o máximo de água destilada quanto foi prudente adicionar, informa indiretamente como é o comportamento para uma amostra mineral. Espera-se que os resultados das medições com amostras minerais sejam menores, tendo em vista a grande diferença entre a constante dielétrica relativa da água - aproximadamente 80 - e o valor da constante dielétrica de uma amostra de minério umedecida a 2% pode oferecer - aproximadamente 4 (LAGE *et al.*) [2018). Assim, para os resultados encontrados nessa etapa, coube avaliar se o comportamento do sistema seria adequado para execução do Experimento III, considerando que o ponto de operação do sistema não se deslocasse com a mudança do tipo de amostra. A diminuição do valor de medição, no pior caso, cairia para aproximadamente 1/20 (80/4) do resultado de medição atual, com o ponto de partida sendo uma amostra de minério com baixa umidade (2%). A progressão desse valor de medição, à medida que a umidade do minério aumenta, seria proporcionalmente menor comparado ao aumento do valor das medições para as inserções de cada lote de água destilada.

Portanto, para os dados obtidos com a montagem 1, a partir desse raciocínio, foi produzida uma resolução de 777 incrementos de timer entre os limites do experimento (ar e água). Desses 777 pontos, a amostra mineral atingiria aproximadamente o valor de 39 unidades (1/20), considerando a mesma graduação. Logo, observando que a variação de umidade na amostra mineral progrediu de 2 a 12% (vide Experimento III), sua constante dielétrica, aumentaria de aproximadamente 4 para 29, obtendo-se um valor estimado de medição de 281 unidades, gerando uma resolução de 242 pontos distintos. Em suma, o sistema usaria essa resolução de 242 pontos para descrever uma variação de 10% de umidade, indicando uma resolução de 0,04% de umidade. Analisando-se o impacto sobre a medição da constante dielétrica considerada na análise, que variou de 4 para 29, a resolução chegaria a 0,1%. O raciocínio foi criado para estabelecer um critério de corte, mediante as montagens realizadas, que poderia indicar que alguma mudança construtiva deveria ser feita antes do avanço para a próxima etapa.

#### Montagem 2

Analogamente à subseção anterior, na Figura 6.6 pode ser observado o resultado gráfico das medições com LCR (200kHz) e pelo sistema implementado com o transdutor da montagem 2.



Figura 6.6: Comportamento dos valores de capacitância da montagem 2: Em (a), valores aferidos com LCR e em (b), valores produzidos pelo transdutor capacitivo.

Aplicando-se a análise da faixa de medição do sistema para a montagem 2, observase resolução de 1372 pontos distintos entre os limites do experimento (ar e água). Houve um aumento, portanto, de mais de 43% de resolução para aproximadamente a mesma massa de água destilada utilizada. A sensibilidade, portanto, aumentou. A partir da mesma análise da subseção anterior, com uma maior resolução na faixa de valores concebida, o valor estimado de resolução, em porcentagem de umidade, chega a 0,01% por unidade de medição, enquanto a resolução percentual da constante dielétrica fica menor que 0,01% por unidade. A Tabela 6.6 apresenta as medições com suas respectivas incertezas associadas.

$\underline{-}$	Capcitância	Fator de	Timer 555
<b>(g)</b>	( <b>pF</b> )	Dissipação	( <b>0,2us</b> )
$0,00 \pm 0,01$	$1,593 \pm 0,004$	$0,0322 \pm 0,0021$	$1233\pm31$
$485,\!44 \pm 0,\!01$	6,128 ± 0,033	$0,2496 \pm 0,0038$	$1474 \pm 32$
970,67 ± 0,01	$9,872 \pm 0,026$	$0,2335 \pm 0,0020$	$1712 \pm 3$
$1456,\!58\pm0,\!01$	$13,02 \pm 0,030$	$0,2655 \pm 0,0020$	$1807 \pm 4$
$1942,26 \pm 0,01$	$19,7\pm0,020$	$0,2588 \pm 0,0020$	$1946 \pm 5$
$2427,89 \pm 0,01$	$23,21 \pm 0,030$	$0,2589 \pm 0,0009$	$2064 \pm 4$
2903,77 ± 0,01	$27,78 \pm 0,010$	$0,3317 \pm 0,0006$	$2186\pm16$
3399,23 ± 0,01	$29,28 \pm 0,020$	$0,274 \pm 0,0011$	$2338\pm10$
3885,33 ± 0,01	$33,5 \pm 0,030$	$0,2864 \pm 0,0013$	$2415 \pm 13$
4370,55 ± 0,01	$36,94 \pm 0,010$	$0,2851 \pm 0,0003$	$2605\pm4$

Tabela 6.6: Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor capacitivo da montagem 2

A partir desses resultados e análises preliminares, o Experimento III foi realizado.

## 6.3.3. Experimento III — Calibração e validação estática

Nesta subseção são apresentados os dados obtidos nos experimentos de calibração estática, realizados com o minério dentro da caixa de PEAD. O volume e formato da caixa simulam a descarga do silo.

Para cada montagem houve dois procedimentos de aferição distintos, um com LCR apenas (com a retirada completa do circuito de medição do transdutor), e outro com as montagens dos transdutores capacitivos (montagens 1 e 2). A motivação, conforme mencionado na metodologia, foi a constatação prévia da influência da PCI do sistema de medição mesmo após a inserção de um by-pass físico nos resistores do circuito oscilador. Os resultados para cada calibração mensurada são apresentados novamente de forma separada, para as montagens 1 e 2.

Esta subseção faz uso dos resultados de medição do método padrão de estufa, descrito na Seção 6.1 e Seção 6.2, como referência (valor verdadeiro convencional) durante o procedimento de calibração. As influências diretas da calibração obtida no Experimento III e, consequentemente, os desdobramentos indiretos que influenciariam os resultados do Experimento IV, também são analisados.

#### Montagem 1

Para a montagem 1, os resultados de medição usando as amostras de minério foram obtidos tanto com o LCR quanto com o transdutor desenvolvido neste trabalho, conforme apresentado na Figura 6.7. Os gráficos se baseiam no resultados das medições do LCR para capacitância (100 kHz e 200 kHz) e respectivas indicações do sistema de medição desenvolvido. Os resultados de medição, expressos com suas respectivas incertezas associadas, estão apresentados na Tabela 6.7.



Figura 6.7: Comparação dos resultados de calibração da montagem 1. (a) apresenta as medições do LCR à 100 kHz, (b) são as medições do LCR à 200 kHz e (c) são as medições do sistema desenvolvido.

II (0/2)	10	0 kHz	20	Incrementos	
$O_{real}(70)$	Capacitância	Fator de	Capacitância	Fator de	de timer
	[ <b>pF</b> ]	dissipação	[ <b>pF</b> ]	dissipação	
1,72	$11,\!24\pm0,\!02$	$0,0126 \pm 0,0006$	$14,\!78\pm0,\!02$	$0,0471 \pm 0,0004$	$4901\pm 6$
3,81	$12,\!43\pm0,\!02$	$0,0037 \pm 0,0006$	$18{,}28\pm0{,}00$	$0,0279 \pm 0,0002$	$4916\pm4$
5,71	$14,\!02\pm0,\!04$	$0,0112 \pm 0,0012$	$19,\!27\pm0,\!02$	$0,0322 \pm 0,0004$	$4968\pm0$
7,57	$15{,}68\pm0{,}04$	$0,\!0088 \pm 0,\!0008$	$20{,}83\pm0{,}00$	$0,0186 \pm 0,0004$	$5058\pm10$
9,41	$16,\!35\pm0,\!04$	$0,0077 \pm 0,0038$	$21,\!88\pm0,\!06$	$0,0236 \pm 0,0061$	$5137\pm4$
9,89	$16{,}91\pm0{,}02$	$0,0085 \pm 0,0002$	$22,\!29\pm0,\!00$	$0,\!0318 \pm 0,\!0002$	$5176\pm39$

Tabela 6.7: Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor capacitivo da montagem 1

O maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrado foi com a medição das amostras minerais com o LCR à 100 kHz, alcançando 98,99% de correlação entre os pontos. Todos os pontos apresentaram comportamento crescente linear, conforme esperado pelo Experimento II e foram ajustados com linhas de tendência com essa característica. O  $R^2$  para as medições com o sistema de medição desenvolvido alcançou 94,17%.

### Montagem 2

Analogamente para a montagem 2, na Figura 6.8 também são apresentados os resultados das medições do LCR para capacitância são apresentados (100 kHz e 200 kHz), conjuntamente com as respectivas indicações do sistema de medição desenvolvido.

Os resultados de medição, expressos com suas respectivas incertezas associadas, estão apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8: Comparação entre medições capacitivas: resultados com LCR e o transdutor capacitivo da montagem 2

11 . (%)	10	0 kHz	20	Incrementos	
Oreal (10)	Capacitância Fator de		Capacitância	de timer	
	[ <b>pF</b> ]	dissipação	[ <b>pF</b> ]	dissipação	
1,72	$21,\!83\pm0,\!04$	$0,008 \pm 0,0004$	$24,\!74\pm0,\!02$	$0,0165 \pm 0,0012$	$2068\pm4$
3,81	$24,\!62\pm0,\!04$	$0,0089 \pm 0,0014$	$28,\!12\pm0,\!04$	$0,0145 \pm 0,0010$	$2106\pm4$
5,71	$27,9\pm0,02$	$0,0078 \pm 0,0012$	$31,\!69\pm0,\!02$	$0,025 \pm 0,0004$	$2173\pm4$
7,57	$28,21 \pm 0,02$	$0,0213 \pm 0,0006$	$32,12 \pm 0,02$	$0,0402 \pm 0,0010$	$2216\pm4$
9,41	$29,\!12\pm0,\!08$	$0{,}029\pm0{,}0008$	$32,2 \pm 0,02$	$0,025 \pm 0,0002$	$2249\pm2$
9,89	$30{,}62\pm0{,}02$	$0,\!0178 \pm 0,\!0004$	$32,\!84\pm0,\!02$	$0,\!0263\pm0,\!0002$	$2289\pm4$



Figura 6.8: Comparação dos resultados de calibração da montagem 2. (a) apresenta as medições do LCR à 100 kHz, (b) são as medições do LCR à 200 kHz e (c) são as medições do sistema desenvolvido.

#### Validação cruzada k-fold

Por meio da utilização do método de validação cruzada k-fold, foi validado o Experimento III. Os valores de k adotados foram 12 e 17 (montagens 1 e 2, respectivamente) pois assim geraram um agrupamento com a mesma quantidade de valores em cada subconjunto. Os modelos de validação foram empregados para a resposta do sistema às amostras, convertendo os resultados de medições de umidade com as equações dos respectivos ajustes encontrados. As tabelas com a massa de dados testadas para cada agrupamento de k subconjuntos são apresentadas no Anexo A.

Para a validação experimental, foram analisadas 96 medições médias da montagem 1 para diferentes umidades e 102 medidas com a montagem 2. Cada medição média foi previamente filtrada pelo desvio padrão amostral de  $\pm 2s$ . As faixas de umidade consideradas, para ambas as montagens, foram as mesmas apresentadas na Seção 6.1.

A relação entre umidade medida com a umidade real pode ser quantificada com os coeficientes de determinação apresentados na Figura 6.9, e que apontam a montagem 2 como a mais indicada para a aplicação no silo. Na Figura 6.9(a) está representada a relação entre umidades medidas e real pela montagem 1 que atingiu 92,14%, enquanto na Figura 6.9(b), analogamente, tem-se a mesma relação alcançada pela montagem 2, que foi de 98,27%.



Figura 6.9: Relação de umidades aferidas e reais, utilizando a metodologia k-fold. Em (a) observa-se a validação para a Montagem 1 e em (b) observa-se a validação para a Montagem 2.

Graficamente é possível observar na Figura 6.9 que a dispersão entre as medições realizadas pela montagem 2 são menores do que as da montagem 1, para cada valor de umidade real fixado no eixo x de ambos os gráficos. Simultaneamente, o conjunto de indicações pertencentes à montagem 2 se aproximam visualmente de um comportamento linear.

### 6.3.4. Experimento IV — Teste no silo

Para o teste realizado no silo, optou-se pelo transdutor da montagem 2. A escolha foi baseada na montagem que apresentou o maior coeficiente de determinação durante o Ex-

perimento III, apresentados nas Figura 6.7(c) e Figura 6.8(c). A qualidade metrológica da curva de calibração da montagem escolhida teve um desempenho superior se analisados os critérios de desvio padrão das indicações, por patamar de umidade, e do valor do coeficiente de determinação, ou seja, o modelo referente à essa montagem traduziu melhor os valores observados, tornando seu desempenho geral superior. Foi realizado, então, um experimento para avaliar a resposta do transdutor da montagem 2 instalado no silo, construído em escala reduzida.

Conforme salientado no Capítulo 5 os critérios de teste no silo foram sistematicamente diferentes dos utilizados na calibração estática, e a estratégia do método de execução dos procedimentos no experimento foram associados aos resultados obtidos. Houve vários fatores externos e internos ao procedimento que impactaram os resultados desta etapa. Esta subseção dedica-se a explicitá-los e analisá-los.

Na Figura 6.10 são mostrados os pontos obtidos pelo sistema a partir da inserção das amostras preparadas da Seção 6.2 e plotados em referência à curva de calibração estática originada pelo Experimento III. Na Figura 6.10(a) é apresentado a curva de erros do sistema e e na Figura 6.10(b), tem-se a representação gráfica da variação das indicações médias com relação à média global para cada ponto dos dados coletados.





Figura 6.10: Resultados gráficos de medição no silo - Experimento IV: (a) curva de erros; (b) Conjunto de pontos das medições efetuadas.

Tabela 6.9 apresenta os resultados de medições com suas respectivas incertezas associadas.

	Tabera 0.9. Teste no sno - Wontagem 2								
$U_{real}$	$U_{med}$	Td	S	U	Td+Re	Td-Re			
2,84	10,92	-8,08	2,12	4,16	-5,96	-10,20			
4,89	17,68	-12,79	2,10	4,11	-10,69	-14,89			
5,54	21,63	-16,09	1,51	2,96	-14,58	-17,61			
7,14	23,08	-15,93	0,78	1,53	-15,15	-16,72			

Tabela 6.9: Teste no silo - Montagem 2

#### Análise crítica e levantamento de hipóteses

A reação apresentada do sistema às novas condições de operação do teste no silo miniatura trouxeram à tona uma análise crítica no entendimento da execução do experimento e de seus limites físicos, bem como algumas falhas metodológicas na sua estruturação. As possíveis causas dos efeitos observados nessa etapa são:

1. Homogenização: No procedimento executado para homogenização das amostras do Experimento IV utilizaram-se amostras maiores de minério (cerca de 60 kg cada), com a finalidade de simular, em escala reduzida, uma aplicação industrial. Contudo, a umidade medida por meio do método padrão de estufa pode não ter representado muito bem a umidade real da amostra. Isso pode ser observado pela diferença encontrada na umidade de cada uma das duas alíquotas de verificação, para cada patamar de umidade. O procedimento de homogenização foi o mesmo, mas não foram mensuradas as perdas do processo,

como a água residual que agregou-se na betoneira durante cada experimento e a umidade relativa do ar que pode ter absorvido ou inserido umidade na amostra, principalmente para as amostras que utilizaram menores quantidades de massa de água. A única forma de minimizar esses fatores seriam, em um ambiente com temperatura e umidade relativa do ar controlados, mensurar as perdas e fazer a verificação de umidade real com toda a massa envolvida no teste.

- 2. Ruídos: as fontes de ruídos identificadas nesse experimento tiveram uma contribuição maior, visto que a falta de controlabilidade dessas interferências e da própria densidade aparente (compactação), podem ter exercido influência de forma direta sobre as medições. A diferença de potencial de aterramento entre o *shield* e a carcaça do silo, as interferência da manipulação simultânea da superfície mineral na entrada do silo (prevenção de entupimento), mesmo sem atingir a região teórica sensível do transdutor, e até a própria presença dos operadores do experimento, podem ter contribuído de forma significativa para o surgimento de erros de medições. Uma possível forma de prevenção dessas influências seria a junção elétrica da carcaça do silo para com outra malha de terra paralela à do sistema de medição.
- 3. Velocidade de escoamento: a velocidade produzida manualmente pelo arraste da lona KP 12000 (sider) cortada não foi estimada. A influência da velocidade de escoamento do minério ao longo do curto período de tempo que o teste foi executado impacta diretamente o sinal de saída do transdutor. Um automatismo nesse quesito se mostra necessário para parametrização e possível correlação dessa variável com os resultados de medição no silo.
- 4. Compactação: conforme detalhado no Capítulo 5, este foi o único experimento que a compactação ou densidade aparente da amostra não foi controlado por algum critério metodológico. Para os experimentos II e III, respectivamente, a compressão da água não é fisicamente possível e das amostras de calibração foi utilizado o critério de máxima compressão manual, respeitando os limites de deformação elástica e de flambagem dos materiais utilizados.

Na Figura 6.11 é possível observar as possíveis causas dos efeitos que se manifestaram no resultado obtido neste experimento, correlacionando a configuração real de como o experimento foi feito com os apontamentos das causas.



Figura 6.11: Representação das hipóteses apontadas pela análise crítica do Experimento IV: (a) homogeneização; (b) ruídos; (c) velocidade de escoamento; (d) compactação.

# 7. Conclusão

Este trabalho teve o objetivo de desenvolver um tipo de configuração de transdutor capacitivo e aplicá-lo para medição de umidade em minério de ferro, implantando-o em um sistema com um bom custo-benefício. Foram desenvolvidas diferentes montagens a fim de se refinar os resultados de medição, e assim, eleger a montagem com melhor desempenho metrológico para um teste com equipamento real. As metodologias sofreram modificações durante o desenvolvimento do trabalho, sendo diagnosticadas diferentes influências no resultado de medição do transdutor desenvolvido.

Para validar os modelos de correlação entre a resposta do sistema de medição e a umidade real das amostras, empregou-se o método de validação cruzada k-fold. A vantagem desta validação é que todas as observações são utilizadas, tanto para treinamento quanto para a validação por meio da separação de uma amostra de teste a cada novo agrupamento, e cada observação é usada para validação exatamente uma vez.

A amplitude do erro sistemático máximo das montagens 1 e 2 foram de 1,57% e 0,72% de umidade, respectivamente. A inferioridade da qualidade metrológica da montagem M1 para com a M2 foi evidenciada em quase todos os casos apresentados. A diferença estrutural das montagens executadas apresentaram resultados de comparação pertinentes para a seleção de uma abordagem não invasiva para medição de umidade em minério de ferro. A transmissão de sinais por fios condutores, mesmo que blindados, cria uma fonte extra de ruído, sendo um dos fatores que potencialmente diminuíram a acurácia que a montagem 1 atingiu na calibração e validação estática. Para a montagem 2, o aspecto de acoplamento do eletrodo de forma rosqueável minimizou a formação de uma possível fonte de ruído, além de facilitar a instalação da PCI à montagem.

O desvio padrão das medições foi analisado experimentalmente, e pôde-se concluir de forma direta que a presença de ar no material sob teste influencia diretamente sua amplitude. Em outras palavras, quanto mais compactada a amostra, mais bem definidos os patamares de umidade ficavam, e menor o desvio padrão associado às indicações feitas pelo sistema.

A controlabilidade dos procedimentos foram identificadas em cada etapa, e sua influência direta, principalmente das variáveis de ruídos e densidade aparente, provou ser determinante para resultados com altas correlações entre o mesurando e as medições. A inserção do *shield*, como forma de potencialização da sensibilidade da face sensora do instrumento conferiu um bom desempenho à ambas as montagens.

A abordagem não invasiva, que também caracteriza essa pesquisa, agregou um fator muito apreciado no setor industrial: a manutenção de instrumentos. Durante todos os testes executados ao longo deste trabalho, a integridade física de todos os componentes, principalmente dos eletrodos do elemento sensor, se mantiveram intactas. Isso, atrelado ao custo-benefício de uma nova abordagem de medição de umidade no chão de fábrica, eleva a estimativa de ganhos mensuráveis para uma análise futura de viabilidade econômica deste projeto, e possível implantação. É possível também, para aumento da relação custo-benefício, a substituição dos módulos de comunicação sem fio utilizados por dispositivos *indoor* que suportem a comunicação via protocolo API com alcance equivalente, que possuam um custo menor.

A faixa de umidade de interesse da Vale, que está entre 7% e 13%, foi contemplada parcialmente pela faixa de medição utilizada por essa pesquisa. Amostras com valores maiores que 12% de umidade real para esse lote de *pellet feed standard*, entretanto, não foram elaboradas por entrarem em um estado físico heterogêneo, devido a baixíssima granulometria do material (Anexo A). Essa última característica enunciada foi vantajosa para os testes executados com amostras minerais, pois diminuíram os possíveis bolsões de ar entre as partículas que são extremamente prejudiciais à qualidade metrológica das medições, conforme discutido anteriormente. O resultado de um comportamento linear para todos os experimentos realizados, portanto, confirma os conceitos existentes no estado da arte.

Foram diagnosticadas várias causas que influenciaram a baixa qualidade metrológica apresentada para o Experimento IV da aplicação na miniatura de silo. As perdas durante a execução do experimento só poderiam ser sanadas com a implementação de um sistema retroalimentado de escoamento de minério, composto pelo silo e um pequeno circuito de esteiras automáticas que elevem e retornem a carga mineral de volta, a uma velocidade controlada. Testes dinâmicos que envolvam esse tipo de medição se tornam impraticáveis sem a assistência de um sistema como esse. A calibração e validação estática dentro do próprio silo é cabível de ser executada, sanando os demais pontos levantados no Experimento IV, como isolamento da carcaça e controle da compactação do minério na região de descarga do silo. Como citado no Capítulo 4, na usina S11D de Carajás, bem como também na usina de Brucutu (São Gonçalo do Rio Abaixo - MG) por exemplo, possuem exemplos reais de silos para carregamento de vagões com método de operação em batelada. Isso significa que estes equipamentos são carregados em lotes (capacidade dos vagões) e esperam a aproximação de cada vagão vazio para que, então, sejam abertos e executem o carregamento inteiro de um vagão em poucos segundos, fechando novamente a descarga e sendo enchidos novamente. Nessa situação específica, e que pode ser encontrada em mais de uma usina em operação, a aplicação do sistema com o transdutor capacitivo não invasivo para medição on-line em silos pode ser empregada, recalibrando-o de acordo com o local instalado.

Portanto, para implantação dinâmica do transdutor desenvolvido neste trabalho, ainda são necessários experimentos mais fiéis às condições reais encontradas industrialmente, para que então se possa analisar a real eficiência do instrumento.

# 7.1. Recomendações de trabalhos futuros

Propõe-se para trabalhos e estudos futuros a elaboração de amostras de outros produtos de minérios, alternando variáveis como granulometria, teores de ferro e densidade aparente, de-talhando mais profundamente os conceitos aqui apresentados. Um experimento com o rejeito

da flotação estabeleceria um limite inferior com relação às medições feitas com o concentrado de minério de ferro, em que para amostras intermediárias bastaria misturar-se proporções diferentes desses dois materiais de mesma origem.

Na parte de preparação das amostras, caso fosse seguida a diretriz de testes mais representativos e/ou dinâmicos com minério que utilizem uma quantidade igual ou superior à utilizada neste trabalho, realizar um teste estatístico de amostragem e estimação da curva de erro do processo de homogeneização, para determinar um possível procedimento operacional que informe qual metodologia seria mais adequada.

Outro ponto seria a implantação de mais módulos de medição. A composição de uma rede robusta destes transdutores de forma on-line no processo, forneceria uma grande massa de dados de medições em pontos distintos das plantas de beneficiamento. Com essa informação em mãos, gestores e encarregados operacionais podem prever e planejar ações que maximizem a produção ou reduza custos com os subprocessos à jusante (desaguamento, por exemplo). Se-guindo a ideia de uma produção maciça de dados sobre as variações da umidade, monitorando pontos chave em uma planta industrial, a integração do sistema a uma rede industrial, ajudaria a transformar o instrumento desenvolvido em uma solução mais completa para a tomada de decisões baseadas em informações do chão de fábrica.

Na Figura 7.1, um esboço dessa ideia de aplicação modular do transdutor foi ilustrado, como forma de ajudar representar uma das diversas oportunidades de emprego da instrumentação desenvolvida nos processos de mineração.



Figura 7.1: Rede de transdutores capacitivos sem fio para monitoramento de silos.

# **Referências Bibliográficas**

- ALLEN, T. Particle size measurement. Springer, 2013.
- ANARAKI, P. A. "Temperature effect on capacitance measurements of the different chemical liquids using a cylindrical capacitive sensor", *Science International*, v. 25, n. 3, 2013.
- BENADDA, M., CARRU, J., DRUON, C. "A measuring device for the determination of the electric permittivity of materials in the frequency range 0.1-300 MHz", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 15, n. 1, pp. 132, 1982.
- BENTO, R. T., SILVA, R. W., DIAS, L. A., et al.. "Design, development and application of a real-time capacitive sensor for automatically measuring liquid level", *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 7, pp. 734, 2019.
- BOYLESTAD, R. L. "Introdução à análise de circuitos elétricos", Tradução de José, 2012.
- BOYLESTAD, R. L., LOUIS, N. "Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. São Paulo: Ed". 2004.
- BRIGGS, L. J. "The mechanics of soil moisture/By Lyman J. Briggs." 1897.
- CHAVES, A. P. Manuseio de sólidos granulados: Coleção Teoria e Prática do Tratamento de Minérios-Volume 5. Oficina de Textos, 2015.
- COUTINHO, F. M., MELLO, I. L., LUIZ, C. "Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações", *Polímeros: ciência e tecnologia*, v. 13, n. 1, pp. 1–13, 2003.
- DE ALMEIDA, M. A. "Sensor capacitivo de nível de fluido refrigerante veicular". jun. 25 2013. MU Patente 9,101,222.
- DE MOURA, E. E. "Proposta computacional para medição on-line do teor de água de grãos de sorgo", 2012.
- DELENIV, A. "On the question of the error in the partial capacitance method", *Technical Physics*, v. 44, n. 4, pp. 356–360, 1999.

- DEMORI, M., FERRARI, V., STRAZZA, D., et al.. "A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water", *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 163, n. 1, pp. 172–179, 2010.
- DIALMÁTICA, E. P. L. D. M. "Catálogo de produtos". ago. 2012. Disponível em: <<u>http:</u> //www.dialmatica.com.br/catalogo\_14-08-2012.pdf>.
- DIGI. "XCTU Configuration and Test Utility Software User Guide". abr. 2017. Disponível em: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/ 90001458-13.pdf>.
- DIGI. "Digi Xbee Ecosystem". jun. 2018. Disponível em: <<u>https://www.digi.com/lp/</u> xbee>.
- EL HAJJ, T. M. *Reconciliação ilusória: compensação de erros por amostragem manual*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2013.
- FERREIRA, G. E. "A competitividade da mineração de ferro no Brasil", 2001.
- FIELDEN, J. E., LLOYD, R. G. "Circuit for measuring capacitance". jul. 10 1984. US Patent 4,459,541.
- FINA FERREIRA, R., VIEIRA POLICARPO, D. L., PEREIRA PADULA, V., et al.. "LI-MITE DE UMIDADE TRANSPORTÁVEL DE MINÉRIOS DE FERRO: ASPEC-TOS REGULATÓRIOS E TÉCNICOS." Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 14, n. 1, 2017.
- GEVORGIAN, S., BERG, H. "Line capacitance and impedance of coplanar-strip waveguides on substrates with multiple dielectric layers", 2001.
- GONG, C.-S. A., CHIU, H. K., HUANG, L. R., et al.. "Low-Cost Comb-Electrode Capacitive Sensing Device for Liquid-Level Measurement", *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 9, pp. 2896–2897, 2016.
- GONZÁLEZ-TERUEL, J. D., TORRES-SÁNCHEZ, R., BLAYA-ROS, P. J., et al.. "Design and Calibration of a Low-Cost SDI-12 Soil Moisture Sensor", *Sensors*, v. 19, n. 3, pp. 491, 2019.
- GY, P. Sampling for analytical purposes. John Wiley & Sons, 1998.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. "Fundamentos da Física–Volume 3–4 a Edição", *LTC, Rio de Janeiro, Brasil*, 2012.
- HUANG, S., STOTT, A., GREEN, R., et al.. "Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 21, n. 3, pp. 242, 1988.

- INDIAMART. "Pycnometer Bottles". 2019. Disponível em: <https://www.indiamart. com/proddetail/pycnometer-bottles-15290456330.html>.
- INSTRUMENTS, T. "Texas Instruments E2E support forums". ago. 2019. Disponível em: <a href="https://www.https://e2e.ti.com/">https://e2e.ti.com/</a>>.
- INSTRUMENTS, T. "LM555 Timer", retrieved on 31st August, v. 31, 2014.
- JONES, R. V., RICHARDS, J. "The design and some applications of sensitive capacitance micrometers", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 6, n. 7, pp. 589, 1973.
- LABCENTER, E. "Circuit Simulation Software". 2019. Disponível em: <<u>https://www.</u>labcenter.com/simulation/>.
- LAGE, V. N. Desenvolvimento de sistema de bancada para medição de umidade de minérios. Tese de Mestrado, Associação Instituto Tecnológico Vale e Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas, Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração - PROFICAM, Ouro Preto, 2018.
- LAGE, V. N., SEGUNDO, A. K. R., E PINTO, T. V. B., et al.. "Bench System for Iron Ore Moisture Measurement". Em: 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 139–142. IEEE, 2018.
- LEAL, A. R. O Superversátil C.I. 555. Seltron, 1982.
- LENOX, A. E. T. "HUMY3000 MEDIÇÃO DE UMIDADE ON-LINE DE SÓLIDOS ATRAVÉS DO PRINCÍPIO DE ULTRAFREQUENCIA TIPO MICROONDAS". 2018. Disponível em: <a href="http://http://www.lenox.ind.br/">http://http://www.lenox.ind.br/</a>.
- MAMISHEV, A. V., SUNDARA-RAJAN, K., YANG, F., et al.. "Interdigital sensors and transducers", *Proceedings of the IEEE*, v. 92, n. 5, pp. 808–845, 2004.
- PIC16F87XA 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers. Microchip, jan. 2013. Rev C.
- NASSR, A. A., AHMED, W. H., EL-DAKHAKHNI, W. W. "Coplanar capacitance sensors for detecting water intrusion in composite structures", *Measurement science and technology*, v. 19, n. 7, pp. 075702, 2008.
- PAUÍNIA, C. "AGITADOR DE PENEIRAS PRODUTEST MODELO T". 2019. Disponível em: <<u>http://cial-paulinia.com.br/produto/</u> agitador-de-peneiras-produtest/>.
- PAUL, C. R. Analysis of multiconductor transmission lines. John Wiley & Sons, 2007.
- PEREIRA, R. G., NAIK, D. A., NAIK, S. S., et al.. "Capacitive Sensor Interfaced with Arduino", *International Journal of Science Technology & Engineering*, v. 2, n. 15, pp. 90–95, 2016.
- PITARD, F. F. Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control. CRC Press, 1993.
- RED, R. E. D. "Philips PW 2404 X-ray Fluorescence". 2019. Disponível em: <<u>http://eqdb.nrf.ac.za/equipment/spectrometers/</u> philips-pw-2404-x-ray-fluorescence>.
- RÊGO SEGUNDO, A. K., RODRIGUES, C. L. C. *Eletricidade em CA*. Editora IFMG-OP, 2015.
- RÊGO SEGUNDO, A. K., MARTINS, J. H., MONTEIRO, P. M. D. B., et al.. "Development of capacitive sensor for measuring soil water content", *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 2, pp. 260–268, 2011.
- RÊGO SEGUNDO, A. K., SILVA, C. C., PINTO, É. S., et al.. "Sistema e método para medição de umidade de uma amostra de solo ou minério". ago. 10 2019a. BR 10 2019 016715
  7.
- RÊGO SEGUNDO, A. K., SILVA PINTO, É., ALMEIDA SANTOS, G., et al.. "Capacitive Impedance Measurement: Dual-frequency Approach", *Sensors*, v. 19, n. 11, pp. 2539, 2019b.
- RÊGO SEGUNDO, A. K., OTHERS. *Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa, 2010.
- RÊGO SEGUNDO, A. K., OTHERS. *Desenvolvimento de um sistema de controle automático* para processo de irrigação e fertirrigação. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa, 2014.
- RICHARDS, J. "Some aspects of transducer immitance measurement", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 15, n. 12, pp. 1251, 1982.
- SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., BRAGA, P. F. A. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. CETEM/MCT, 2007.
- SILVA, M. E. H., RÊGO SEGUNDO, A. K., DA SILVA, S. A. L. "Portable non-invasive capacitive transducer for measuring fuel level". Em: SENSORS, 2017 IEEE, pp. 1– 3. IEEE, 2017.

- SOARES, P. H. V., JESUS, W., JOSÉ, R. F. S., et al.. "Redução da umidade no pallet feed da usina de Conceição I". Em: 18º Simpósio de Mineração, ABM Week 2017, pp. 1–12, São Paulo, Brasil, 2017.
- SU, S. L., SINGH, D., BAGHINI, M. S. "A critical review of soil moisture measurement", *Measurement*, v. 54, pp. 92–105, 2014.
- VALE. "Carajás visiting the world's largerst". 2017. Disponível em: <http: //www.vale.com/brasil/EN/business/mining/iron-ore-pellets/ Documents/carajas/index.html>.
- VENDIK, O., ZUBKO, S., NIKOL'SKII, M. "Modeling and calculation of the capacitance of a planar capacitor containing a ferroelectric thin film", *Technical Physics*, v. 44, n. 4, pp. 349–355, 1999.
- VIANA, S. A. "Microwave-based Moisture Measurement of Bauxite Ore on Conveyor Belts", *Engineering and Mining Journal*, v. 214, n. 1, pp. 44, 2013.
- WARWICK, A. *Masters of theory: Cambridge and the rise of mathematical physics*. University of Chicago Press, 2003.
- WEBSTER, J. G. Measurement Instrumentation and Sensors. CRC Press LLC, 1999.

## Anexo A

## Análises físico-químicas

As análises solicitadas ao laboratório tiveram o objetivo de caracterizar tanto físico, quanto quimicamente o minério de ferro fornecido pela mineradora apoiadora da pesquisa, em suas duas modalidades: rejeito e concentrado de flotação. A Figura 7.1 exibe os resultados na íntegra do relatório enviado pela empresa de análises.

FRRE CENTRO DE CARACTERIZAÇÃO DE MINERIAS	Recent de Centro de								FRX Service Ltda Caracterização de Minerais e Materiais										
Cliente: Solicitante: Data:	MARCELO SILVA MARCELO SILVA 20 de Maio de 2019																		
								En	saios (%	)									
	Identificação	Gravimetria	ravimetria Fluorescência de Raios X Densidad																
FRX	Cliente	PPC 1000°C	AI2O3	CaO	Cr2O3	Fe	K2O	MgO	Mn	Na2O	Р	SiO2	TiO2	Aparente	Real				
43452	CONCENTRADO DA FLOTAÇÃO	0,89	0,67	0,02	< 0,01	66,86	< 0,01	< 0,1	0,03	< 0,1	0,017	2,63	0,05	2,56	3,90				
43453	REJEITO DA FLOTAÇÃO	0,65	0,83	0,03	< 0,01	14,11	< 0,01	< 0,1	0,01	< 0,1	0,010	78,37	0,01	1,76	2,34				
	Identificação	ificação Ensaios (%) x Peneiras (mm)																	
FRX	Cliente	0,15	0,05	< 0,045															
43452	CONCENTRADO DA FLOTAÇÃO	1,95	32,38	65,66															
43453	REJEITO DA FLOTAÇÃO	5,04	42,66	52,30															
-																			
-																			
	IPT-23		0.71	0.02	< 0.01	64.36	< 0.01	< 0.1	0.07	< 0.1	0.049	3.73	0.12						
	IPT-27		3,72	0,02	< 0,01	61,77	< 0,01	< 0,1	0,23	< 0,1	0,051	7,75	0,11						
	IMFE-002		0,30	0,07	< 0,01	56,36	0,01	< 0,1	0,07	< 0,1	0,070	11,77	0,12						
	Identificação						En	saios (%	) x Pene	iras (mm	)								
FRX	Cliente	19,00	16,00	12,50	9,50	8,00	6,30	4,00	2,00	1,40	1,00	< 1,00							
43482	TC 05 07/05/19	0,00	0,00	0,00	0,31	2,18	19,73	48,70	26,48	1,45	0,42	0,73							
		Fe> F	e2O3	0,69	9943	1													

		-,																																																														
Fatores de conversão para óxidos:	Mn> MnO2	0,63192																						i i																												1		i.	Ĺ			L	L	L		1	1	L
	P> P2O5	0,43643				ı.																																																								ĺ.	ĺ.	l.
ERX Service Ltda - CNP L:06164520/0001-16 - Insc. Es	tadual : Isento		_	_		-	-	-	-	-	-	-				-	-	-	-			-	-	-	-					-				-	-		-	-	-	-	-	-							-	-	-			-	-	-		-	-	-				-
Av Beira Rio 10245 Distrito Industrial Simão da Cunha	Santa Luzia - MC	CEP : 33040-	)-26	-260	260	26	26	6	6(	6	260	26	6	6	51	:0		6	26	26	26	26	.20	26	26	26	26	26	26	26	26	2	2	21	2	51	6	6	6	۶F	۶F	2F	26	26	P	6	6	51	6	>F	21	2	2	20	2	.2	.2	2	2	2	.2	-2	-2	-2
Tel: (31) 9150-1841	i, cana zuzia inc	, 52 00040	- 20	200	-00	-0	-0	Č	~								1	1		_	- (		~	~``	-	_							-	_,	1		1	1	Ĭ			-0	_						1	1	-	1			_	_	1	-	Ξ	Ξ	1	1	ĉ	ĉ
16. (31) 3133-1641			_	_	_	_	_	_	_	_	_	_				-		-	_			_	_	_	_					_				_				-		_	_	_								-	-			_	_	_	_	_	-	-	_	_	_	_

Figura 2: Resultados laboratorias das análises físico químicas do concentrado e rejeito da flotação

Para descobrir a a concentração de ferro (Fe) e de Silica (SiO2), principal contaminante dos minérios itabiríticos, foram solicitadas o teste de Fluorescência de Raio X (FRX), análise de densidade e granulometria.

O laboratório executou uma preparação padrão das amostras para os três testes supracitados, contemplando os seguintes procedimentos:

- a) secagem a 105°C;
- b) redução granulométrica para menor que 2,00 mm, quando aplicável;
- c) homogenização;
- d) quarteamento;
- e) e pulverização em moinho de panelas de carbeto de tungstênio 95% até redução menor que 200 mesh.

O equipamento para análise de FRX foi o Phillips PW2404, tubo com anodo de ródio de 4 Kw. As curvas são calibradas com padrões reconhecidos internacionalmente, segundo o laboratório. As amostras foram preparadas por fusão com tetraborato de lítio em máquina Claisse. Os elementos que o FRX comumente identifica variam entre  $Al_2O_3$ , CaO,  $Cr_2O_3$ , F,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ , MgO, MnO,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ , PPC 1000°C,  $SiO_2$ ,  $SO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$  e ZnO. Os elementos realmente identificados foram apenas  $Al_2O_3$ , CaO,  $Cr_2O_3$ , Fe,  $K_2O$ , MgO, Mn,  $Na_2O$ , P,  $SiO_2$  e  $TiO_2$ . Um exemplar do FRX utilizado é apresentado na Figura 7.1.





## Fonte: RED (2019)

Para a análise granulométrica, foram escolhidas, a priori, no fomulário de solicitação dos testes duas peneiras com faixa passante de 0,150 mm e 0,045 mm. Como critério complementar, o próprio laboratório inseriu mais uma paneira no teste granulométrico para mapeamento intermediário de granulometria, após definidos os limites inferior e superior do procedimento. A faixa passante dessa terceira peneira foi de 0,050 mm. O equipamento utilizado nesse procedimento foi granulômetro. A amplitude, frequência e tempo de procedimento não foram registrados, mas costuma-se adotar valores que atendam requisitos normativos relacionados às finalidades dos resultados para com o cliente final do laboratório. Já para a análise de densidade foi usado o método do picnômetro, que consiste na dissolução da amostra sólida em água à temperatura ambiente de 24°C (substância padrão) para determinação de sua massa específica, e assim chegar na densidade aparente do material. O picnômetro em si consiste em uma vidraçaria esmerilhada e temperada, de baixo coeficiente de dilatação. Ambos os instrumentos podem ser observados na Figura 7.1.



Figura 4: Granulômetro e Picnômetro, respectivamente. Fonte: IndiaMART (2019); Pauínia (2019)

## Dados da Validação k-fold

	D ~			Respectiva		
k	Regressao	$R^2$	Subconjunto	indicação	Ureal	Umed
	linear		aleatorio	associada	[%]	[%]
			51	4968	5,71	4,54
			2	4897	1,72	2,58
			38	4967	5,71	4,51
1	$0.0275_{\rm W} = 122.0942$	0.0276	43	4968	5,71	4,54
1	0,0273X - 152,0845	0,9370	45	4968	5,71	4,54
			62	5059	7,57	7,04
			19	4914	3,81	3,05
			93	5183	9,89	10,45
			44	4968	5,71	4,96
	0,0278x - 133,1548		39	4967	5,71	4,93
		0,9367	83	5139	9,41	9,71
2			94	5192	9,89	11,18
2			56	5055	7,57	7,37
			95	5202	9,89	11,46
			25	4916	3,81	3,51
			8	4902	1,72	3,12
			57	5056	7,57	7,42
			23	4915	3,81	3,59
			87	5154	9,89	10,09
3	0.0272 x = 130.1000	0 0335	48	4968	5,71	5,03
5	0,0272x - 150,1000	0,7555	34	4919	3,81	3,70
			31	4918	3,81	3,67
			15	4904	1,72	3,29
_			5	4899	1,72	3,15
			71	5135	9,41	9,38
			72	5136	9,41	9,41
			77	5137	9,41	9,43
4	0.0271 x = 129.7792	0 9289	70	5134	9,41	9,35
-	0,02717 129,7792	0,7207	7	4901	1,72	3,04
			20	4914	3,81	3,39
			89	5167	9,89	10,25
			3	4898	1,72	2,96

Tabela 1: Validação cruzada k-fold - Montagem 1

k	Regressão linear	<i>R</i> <sup>2</sup>	Subconjunto aleatório	Respectiva indicação associada	U <sub>real</sub> [%]	U <sub>med</sub> [%]
_			75	5137	9,41	9,23
			9	4902	1,72	2,74
			50	4968	5,71	4,56
5	0.0076 120.5500	0.0256	52	5052	7,57	6,88
3	0,0270x - 152,5520	0,9330	41	4968	5,71	4,56
			69	5133	9,41	9,12
			91	5174	9,89	10,25
			96	5210	9,89	11,24
			59	5057	7,57	7,22
			1	4896	1,72	2,86
			30	4918	3,81	3,46
6	0,0271x - 129,8211	0.0244	61	5058	7,57	7,25
0		0,9344	4	4898	1,72	2,91
			86	5146	9,89	9,64
			49	4968	5,71	4,81
			47	4968	5,71	4,81
	0,0269x - 128,6789		74	5136	9,41	9,48
		0.0324	73	5136	9,41	9,48
			88	5162	9,89	10,18
7			10	4902	1,72	3,18
/		0,9524	53	5053	7,57	7,25
			17	4905	1,72	3,27
			11	4902	1,72	3,18
			21	4915	3,81	3,53
			92	5178	9,89	10,61
			14	4904	1,72	3,24
			18	4913	3,81	3,48
8	0 0260 v 128 6780	0 0324	42	4968	5,71	4,96
0	0,0209X - 128,0789	0,9324	90	5171	9,89	10,42
			13	4903	1,72	3,21
			22	4915	3,81	3,53
			65	5062	7,57	7,49
			84	5139	9,41	9,54
			27	4916	3,81	3,43
			79	5138	9,41	9,51
0	0 0274x - 131 2660	0 0303	66	5064	7,57	7,49
9	0,02177 - 131,2009	0,2000	24	4915	3,81	3,40
			82	5139	9,41	9,54
			55	5054	7,57	7,21
			58	5056	7,57	7,27

k	Regressão linear	<i>R</i> <sup>2</sup>	Subconjunto aleatório	Respectiva indicação associada	U <sub>real</sub> [%]	U <sub>med</sub> [%]
			64	5061	7,57	7,23
			78	5137	9,41	9,31
			16	4904	1,72	2,95
10	0.0273 = 130.0300	0 9352	36	4967	5,71	4,67
10	0,02757 - 150,2502	0,9352	54	5054	7,57	7,04
			35	4967	5,71	4,67
			26	4916	3,81	3,28
			32	4918	3,81	3,33
	0,0275x - 131,6282		67	5066	7,57	7,69
		0,9302	76	5137	9,41	9,64
			46	4968	5,71	4,99
11			29	4917	3,81	3,59
11			80	5138	9,41	9,67
			81	5138	9,41	9,67
			85	5140	9,41	9,72
			33	4918	3,81	3,62
			12	4903	1,72	2,95
			37	4967	5,71	4,69
			28	4917	3,81	3,33
10	$0.0271_{\rm T}$ 120.0202	0.0262	68	5068	7,57	7,42
12	0,0271X - 129,9202	0,9302	40	4968	5,71	4,71
			60	5058	7,57	7,15
			63	5060	7,57	7,21
			6	4900	1,72	2,87

$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\frac{1}{4} 0,0374x - 75,2774} 0,9840 = \frac{6}{2067} 0,2499 = 9,41 - 1,72 - 2,03}{81} = \frac{2,00}{2,249} = 9,41 - 1,72 - 2,18} - \frac{6}{2,249} = 9,41 - 1,72 - 2,18}{53} = 2,13 - 7,57 - 7,49} - \frac{11}{2,0068} = 1,72 - 2,10}{7 - 2,067 - 1,72 - 2,07} - \frac{13}{33} = 2,009 - 3,81 - 3,81 - 3,81}{3,30} - \frac{11}{3} = 2,069 - 1,72 - 2,14}{33} = 2,009 - 3,81 - 3,81 - 3,81} - \frac{11}{3} - 2,069 - 1,72 - 2,14}{33} = 2,009 - 3,81 - 3,81 - 3,81} - \frac{11}{3} - 2,069 - 1,72 - 2,14}{33} = 2,009 - 3,81 - 3,81 - 3,81} - \frac{11}{3} - 2,069 - 1,72 - 2,14}{33} = 2,009 - 3,81 - 3,81 - 3,81} - \frac{11}{3} - 2,069 - 1,72 - 2,14}{33} = 2,009 - 3,81 - 3,81 - 3,81} - \frac{11}{3} - 2,069 - 1,72 - 2,14}{33} = 2,109 - 3,81 - 3,81} - \frac{11}{3} - 2,069 - 1,72 - 2,14}{33} = 2,171 - 5,71 - 5,97} - \frac{14}{44} - 2,173 - 5,71 - 6,04}{79} - 2,249 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 7,00 - 2,247 - 9,41 - 8,89} - 1,00 - 2,00 - 9,89 - 1,00 - 0,0$
$\frac{6}{2067} = \frac{1,72}{2,03} = \frac{6}{81} = \frac{2067}{2249} = \frac{1,72}{9,41} = \frac{2,03}{881} = \frac{2249}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,84}{8,84} = \frac{118}{75} = \frac{2249}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,84}{8,84} = \frac{117}{17} = \frac{2071}{2071} = \frac{1,72}{1,72} = \frac{2,18}{2,10} = \frac{7}{7} = \frac{2067}{1,72} = \frac{2,10}{7,72} = \frac{7}{2,007} = \frac{2,14}{33} = \frac{2069}{1,72} = \frac{1,11}{2,14} = \frac{2069}{3,81} = \frac{3,64}{3,64} = \frac{86}{2285} = \frac{2285}{9,89} = \frac{9,89}{10,24} = \frac{39}{39} = \frac{2171}{2,171} = \frac{5,71}{5,97} = \frac{5,97}{2249} = \frac{44}{2289} = \frac{2249}{9,41} = \frac{8,89}{89} = \frac{2249}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{225} = \frac{2215}{7,57} = \frac{7,56}{7,64} = \frac{99}{99} = \frac{2290}{2290} = \frac{9,89}{9,89} = \frac{10,40}{10,40} = \frac{25}{2215} = \frac{2106}{2,757} = \frac{3,81}{7,64} = \frac{3,81}{99} = \frac{2286}{2285} = \frac{9,89}{9,89} = \frac{10,40}{10,40} = \frac{41}{2289} = \frac{2286}{9,89} = \frac{10,40}{10,40} = \frac{41}{2249} = \frac{2249}{9,41} = \frac{8,89}{35} = \frac{1}{2066} = \frac{1,72}{2,204} = \frac{1}{2,44} = \frac{2066}{1,72} = \frac{1}{2,04} = \frac{74}{2249} = \frac{2249}{9,41} = \frac{8,89}{35} = \frac{1}{2063} = \frac{1,72}{2,72} = \frac{2248}{9,41} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{1}{22249} = \frac{9,41}{2289} = \frac{8,89}{72} = \frac{2249}{2249} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{1}{22249} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{1}{22249} = \frac{9,41}{2249} = \frac{8,89}{72} = \frac{2249}{72} = \frac{9,41}{2249} = \frac{8,89}{72} = \frac{2249}{72} = \frac{9,41}{2248} = \frac{8,89}{72} = \frac{2249}{72} = \frac{9,41}{74} = \frac{8,89}{72} = \frac{1}{72} = \frac{2248}{72} = \frac{9,41}{74} = \frac{8,89}{72} = \frac{1}{72} = \frac{2248}{72} = \frac{9,41}{74} = \frac{8,89}{72} = \frac{1}{72} = \frac{2248}{72} = \frac{9,41}{74} = \frac{8,89}{72} = \frac{2249}{72} = \frac{9,41}{74} = \frac{8,89}{72} = \frac{1}{72} = \frac{1}$
$\frac{1}{4} 0,0374x - 75,2774 0,9840 = \frac{81}{18} = \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,84} \frac{8,84}{18} = \frac{102}{3,81} \frac{3,34}{3,34} \frac{75}{75} = \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,84} \frac{8,84}{17} \frac{117}{2071} \frac{2,12}{1,72} \frac{2,18}{2,18} \frac{53}{53} = \frac{2213}{7,57} \frac{7,49}{7,49} \frac{111}{2068} \frac{2069}{1,72} \frac{1,72}{2,10} \frac{2,14}{33} \frac{2069}{3,81} \frac{3,64}{366} \frac{86}{2285} \frac{2285}{9,89} \frac{9,89}{10,24} \frac{39}{39} = \frac{2171}{5,71} \frac{5,71}{5,97} \frac{5,97}{44} \frac{44}{2173} \frac{2,171}{5,71} \frac{5,97}{59} \frac{444}{2289} \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,89} \frac{8,89}{70} \frac{2247}{2249} \frac{9,41}{9,41} \frac{8,89}{889} \frac{70}{2247} \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,89} \frac{8,89}{10,40} \frac{25}{25} \frac{2106}{3,81} \frac{3,52}{3,52} \frac{55}{2214} \frac{7,57}{7,57} \frac{7,64}{99} \frac{99}{2290} \frac{9,89}{9,89} \frac{10,40}{41} \frac{41}{2172} \frac{2,77}{5,71} \frac{6,05}{6,05} \frac{4}{4} \frac{2066}{1,72} \frac{2,04}{74} \frac{74}{2249} \frac{9,41}{9,41} \frac{8,89}{8,89} \frac{1}{12063} \frac{1,72}{1,72} \frac{1,93}{35} \frac{35}{2169} \frac{2169}{5,71} \frac{5,89}{72} \frac{72}{2248} \frac{9,41}{9,41} \frac{8,85}{67} \frac{67}{2218} \frac{7,57}{7,57} \frac{7,63}{7,53} \frac{49}{80} \frac{2249}{9,41} \frac{8,89}{8,85} \frac{1}{67} \frac{2219}{2218} \frac{9,41}{7,57} \frac{8,85}{7,73} \frac{7,73}{7,53} \frac{80}{2249} \frac{2249}{9,41} \frac{8,89}{8,85} \frac{1}{6,70} \frac{2249}{2249} \frac{9,41}{9,41} \frac{8,89}{8,85} \frac{1}{6,7} \frac{2218}{2218} \frac{7,57}{7,73} \frac{7,73}{80} \frac{49}{2249} \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,85} \frac{80}{67} \frac{2218}{2218} \frac{7,57}{7,73} \frac{7,50}{7,57} \frac{1}{7,50} \frac{1}{7,59} \frac{1}{7,59$
$\frac{1}{4} 0,0374x - 75,2774 0,9840 = \frac{18}{75} = \frac{2102}{2249} = \frac{3,81}{9,41} = \frac{3,34}{8,84} = \frac{3,34}{17} = \frac{3,34}{2249} = \frac{3,81}{9,41} = \frac{3,34}{8,84} = \frac{3,34}{17} = \frac{3,34}{2249} = \frac{3,31}{9,41} = \frac{3,34}{8,84} = \frac{3,34}{17} = \frac{3,34}{2249} = \frac{3,31}{2213} = \frac{3,34}{7,57} = \frac{3,34}{7,49} = \frac{3,34}{7} = \frac{3,34}{7,57} = \frac{3,34}{7,49} = \frac{3,34}{7,57} = \frac{3,35}{7,57} = \frac{3,36}{7,57} = 3,36$
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\frac{17}{2} \begin{array}{c} 20,0375x - 75,4465 \\ 0,9827 \\ \hline 11 \\ 20,0375x - 75,4465 \\ 0,9827 \\ \hline 13 \\ \hline 13 \\ \hline 2069 \\ \hline 1,72 \\ 20,0375x - 75,4465 \\ 0,9827 \\ \hline 13 \\ \hline 2069 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2067 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2067 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2067 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2067 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2067 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2067 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2067 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 33 \\ \hline 2069 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 33 \\ \hline 2069 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 33 \\ \hline 2069 \\ \hline 13 \\ \hline 2069 \\ \hline 1,72 \\ 20,01 \\ \hline 7 \\ \hline 2009 \\ \hline 13 \\ \hline 2069 \\ \hline 10,01 \\ \hline 10 \\ $
$\frac{53}{20,0375 \times -75,4465} = \frac{53}{20,0375 \times -75,4465} = \frac{53}{20,0376 \times -75,6675} = \frac{53}{20,0376 \times -75,2260} = \frac{53}{20,0376 \times -75,2260} = \frac{53}{20,0374 \times -75,075} = \frac{53}{20,0374 \times -75,075} = \frac{53}{20,0374 \times -75,075} = \frac{53}{20,0374 \times -75,075} = 53$
$\frac{2}{2} 0,0375x - 75,4465 0,9827 \\ \hline 11 \\ 2 0,0375x - 75,4465 0,9827 \\ \hline 13 \\ 3 0,0375x - 75,6675 \\ 0,9845 \\ \hline 13 \\ 3 0,0376x - 75,6675 \\ 0,9845 \\ \hline 13 \\ 3 0,0376x - 75,6675 \\ 0,9845 \\ \hline 14 \\ 3 9 \\ \hline 171 \\ 5 71 \\ 5 9 \\ 2249 \\ 9,41 \\ 8,89 \\ \hline 10 \\ 225 \\ 2115 \\ 7,57 \\ 7,62 \\ 94 \\ 2289 \\ 9,89 \\ 10,40 \\ 25 \\ 2115 \\ 7,57 \\ 7,62 \\ 94 \\ 2289 \\ 9,89 \\ 10,40 \\ 25 \\ 2116 \\ 3,81 \\ 3,52 \\ \hline 15 \\ 2214 \\ 7,57 \\ 7,64 \\ 99 \\ 2290 \\ 9,89 \\ 10,40 \\ 25 \\ 2106 \\ 3,81 \\ 3,52 \\ \hline 1 \\ 2063 \\ 1,72 \\ 2,04 \\ \hline 1 \\ 2063 \\ 1,72 \\ 1,93 \\ \hline 1 \\ 80 \\ 2249 \\ 9,41 \\ 8,89 \\ \hline 1 \\ 206 \\ 1,72 \\ 2,04 \\ \hline 1 \\ 80 \\ 2249 \\ 9,41 \\ 8,89 \\ \hline 1 \\ 206 \\ 1,72 \\ 2,04 \\ \hline 1 \\ 1 \\ 206 \\ 1,72 \\ 2,04 \\ \hline 1 \\ 1 \\ 206 \\ 1,72 \\ 2,04 \\ \hline 1 \\ 1 \\ 206 \\ 1,72 \\ 2,04 \\ \hline 1 \\ 1 \\ 206 \\ 1,72 \\ 2,04 \\ \hline 1 \\ 1 \\ 206 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ $
$\frac{2}{2} 0,0375x - 75,4465 0,9827   13 2067 1,72 2,07 13 2069 1,72 2,14 33 2109 3,81 3,64 86 2285 9,89 10,24 39 2171 5,71 5,97 39 2171 5,71 5,97 44 2173 5,71 6,04 79 2249 9,41 8,89 70 2247 9,41 8,82 59 2215 7,57 7,62 94 2289 9,89 10,40 25 2106 3,81 3,52 59 2215 7,57 7,62 94 2289 9,89 10,40 25 2106 3,81 3,52 55 2214 7,57 7,64 99 2290 9,89 10,51 89 2286 9,89 10,36 90 2287 9,89 10,40 41 2172 5,71 6,05 4 2066 1,72 2,04 41 2172 5,71 6,05 4 2066 1,72 2,04 74 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 55 2169 5,71 5,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,85 67 2218 7,57 7,73 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,85 67 2218 7,57 7,73 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,93 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,020 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,020 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,020 80 2249 9,41 8,89 1 2063 1,72 1,020 80 2249 9,41 8,89 10,000 80 2249 9,41 8,89 10,000 80 200 80 200 80 9,000 80 200 80 80 200 80 80 200 80 80 80 200 80 80 200 80 80 200 80 80 80 80 200 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 $
$\frac{2}{4} 0,0375x - 75,2260} 0,9827 \frac{13}{33} 2069 1,72 2,14}{33} 2109 3,81 3,64} \frac{2}{33} 2109 3,81 3,64}{86} 2285 9,89 10,24} \frac{39}{39} 2171 5,71 5,97}{39} 2171 5,71 6,04} \frac{39}{79} 2249 9,41 8,89}{79} 2249 9,41 8,89} \frac{444}{79} 2249 9,41 8,89}{70} 2247 9,41 8,82} \frac{59}{59} 2215 7,57 7,62}{94} 2289 9,89 10,40} 25 2106 3,81 3,52} \frac{55}{2214} 7,57 7,64}{99} 2290 9,89 10,51} \frac{55}{2214} 7,57 7,64}{99} 2290 9,89 10,36} \frac{99}{2290} 9,89 10,36}{41} 2172 5,71 6,05} \frac{44}{2066} 1,72 2,04}{41} 2,049 - 2,04} \frac{74}{2249} 9,41 8,89}{12063} \frac{1,72 1,93}{35} 2169 5,71 5,89}{72} \frac{2248}{2248} 9,41 8,85}{67 2218 7,57 7,73} \frac{80}{2249} 9,41 8,89}{2249} \frac{10,2249}{2249} 9,41 8,85} \frac{10,2249}{72} 2248 9,41 8,85} \frac{10,2249}{72} 2248 9,41 8,85} \frac{10,2249}{72} 2248 9,41 8,85} \frac{10,2249}{72} 2248 9,41 8,85} \frac{10,2249}{72} 9,41 8,89} $
$ \frac{2}{3} 0,0373 \times -75,4463 0,9827 \\ 33 2109 3,81 3,64 \\ 86 2285 9,89 10,24 \\ 39 2171 5,71 5,97 \\ 44 2173 5,71 6,04 \\ 79 2249 9,41 8,89 \\ 70 2247 9,41 8,89 \\ 70 2247 9,41 8,82 \\ 59 2215 7,57 7,62 \\ 94 2289 9,89 10,40 \\ 25 2106 3,81 3,52 \\ 99 2290 9,89 10,40 \\ 25 2114 7,57 7,64 \\ 99 2290 9,89 10,51 \\ 89 2286 9,89 10,36 \\ 90 2287 9,89 10,40 \\ 41 2172 5,71 6,05 \\ 4 2066 1,72 2,04 \\ 41 2172 5,71 6,05 \\ 4 2066 1,72 2,04 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 1 2063 1,72 1,93 \\ 35 2169 5,71 5,89 \\ 1 2063 1,72 1,93 \\ 35 2169 5,71 5,89 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 67 2218 7,57 7,73 \\ 80 2249 9,41 8,89 \\ 71 48,89 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 67 2218 7,57 7,73 \\ 80 2249 9,41 8,89 \\ 71 6,05 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 67 2218 7,57 7,73 \\ 80 2249 9,41 8,89 \\ 71 6,05 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 67 2218 7,57 7,73 \\ 80 2249 9,41 8,89 \\ 71 6,05 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2249 9,41 8,89 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 72 2248 9,41 8,85 \\ 73 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,85 \\ 74 2249 9,41 8,85 \\ 74 2249 9,41 8,85 \\ 74 2249 9,41 8,85 \\ 74 2249 9,41 8,85 \\ 74 2249 9,41 8,85 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 2249 9,41 8,89 \\ 74 22$
$\frac{86}{39} = \frac{2285}{9,89} = \frac{9,89}{10,24}$ $\frac{39}{39} = \frac{2171}{5,71} = \frac{5,71}{5,97}$ $\frac{44}{2173} = \frac{5,71}{6,04} = \frac{6,04}{79}$ $\frac{79}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{8,89}$ $\frac{70}{2247} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{8,82}$ $\frac{70}{225} = \frac{2215}{2106} = \frac{7,57}{7,57} = \frac{7,62}{7,64}$ $\frac{99}{225} = \frac{2216}{2106} = \frac{3,81}{3,52} = \frac{3,52}{25}$ $\frac{55}{2214} = \frac{7,57}{7,64} = \frac{999}{2290} = \frac{2286}{9,89} = \frac{9,89}{10,36}$ $\frac{90}{2287} = \frac{2286}{9,89} = \frac{9,89}{10,36}$ $\frac{41}{2172} = \frac{5,71}{5,71} = \frac{6,05}{6,05}$ $\frac{4}{2066} = \frac{1,72}{2,04} = \frac{2,04}{14} = \frac{2063}{1,72} = \frac{1,93}{2,04}$ $\frac{74}{72} = \frac{2248}{2249} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{8,89}{12286} = \frac{1,72}{2248} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{8,89} = \frac{1,72}{2249} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{1,72}{2249} = \frac{1,72}{2248} = \frac{1,72}{248} = \frac{1,72}{248} = \frac{1,72}{248} = \frac{1,72}{248} = \frac$
$\frac{39}{30,0376x - 75,6675} = \frac{39}{2171} = \frac{5,71}{5,71} = \frac{5,97}{6,04}$ $\frac{44}{79} = \frac{2249}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{8,89}$ $\frac{70}{2247} = \frac{2247}{9,41} = \frac{9,41}{8,82} = \frac{8,89}{9,40} = \frac{2289}{9,40} = \frac{9,89}{10,40}$ $\frac{25}{25} = \frac{2106}{2106} = \frac{3,81}{3,52} = \frac{55}{2214} = \frac{7,57}{7,57} = \frac{7,64}{7,64}$ $\frac{99}{99} = \frac{2290}{2290} = \frac{9,89}{9,89} = \frac{10,40}{10,40}$ $\frac{41}{41} = \frac{2172}{2172} = \frac{5,71}{5,71} = \frac{6,05}{6,05}$ $\frac{4}{4} = \frac{2066}{1,72} = \frac{1,72}{2,04}$ $\frac{74}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{10,36}$ $\frac{1}{72} = \frac{2248}{2248} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{8,89}$ $\frac{1}{72} = \frac{2248}{2248} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{8,89}{10,2249} = \frac{1,72}{1,93}$ $\frac{49}{2249} = \frac{2174}{2249} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{8,89}{10,2249} = \frac{1,72}{2248} = \frac{1,72}{1,93} = \frac{1,72}{1,93}$
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$3 0,0376x - 75,6675 0,9845 = \frac{79}{70} = \frac{2249}{2247} = 9,41 = 8,89 = 70 = 2247 = 9,41 = 8,82 = 59 = 2215 = 7,57 = 7,62 = 94 = 2289 = 9,89 = 10,40 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 3,52 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 3,52 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 3,52 = 25 = 2106 = 3,81 = 3,52 = 2286 = 9,89 = 10,40 = 411 = 2172 = 5,71 = 6,05 = 41 = 2063 = 1,72 = 2,04 = 3,41 = 8,89 = 1 = 2063 = 1,72 = 1,93 = 3,52 = 2,54 = 9,41 = 8,89 = 1 = 2063 = 1,72 = 1,93 = 3,57 = 7,73 = 80 = 2249 = 9,41 = 8,89 = 2174 = 5,71$
$3 0,0376x - 75,6675 0,9845 = \frac{70}{59} = \frac{2247}{2215} = \frac{9,41}{7,57} = \frac{8,82}{7,62} = \frac{94}{2289} = \frac{9,89}{9,89} = \frac{10,40}{25} = \frac{2216}{2106} = \frac{3,81}{3,52} = \frac{3,55}{25} = \frac{2214}{214} = \frac{7,57}{7,57} = \frac{7,64}{7,64} = \frac{99}{99} = \frac{2290}{2290} = \frac{9,89}{9,89} = \frac{10,36}{10,36} = \frac{90}{2287} = \frac{2286}{9,89} = \frac{9,89}{10,36} = \frac{10,36}{4} = \frac{10,0378x - 76,0513}{4} = \frac{10,0378x - 76,0513}{4} = \frac{10,0378x - 76,0513}{2000} = \frac{10,0378x - 76,0513}{2286} = \frac{10,0378x - 76,0513}{2287} = \frac{10,0378x - 75,0260}{2287} = \frac{10,0378x - 75,027}{2288} = \frac$
$\frac{50,0376x - 75,0675}{94} = \frac{59}{2215} = \frac{2215}{7,57} = \frac{7,57}{7,62} = \frac{7,57}{94} = \frac{7,57}{2289} = \frac{7,57}{9,89} = \frac{7,57}{10,40} = \frac{7,57}{25} = \frac{2106}{3,81} = \frac{3,52}{3,52} = \frac{55}{2214} = \frac{7,57}{7,57} = \frac{7,64}{7,64} = \frac{99}{99} = \frac{2290}{9,89} = \frac{9,89}{10,51} = \frac{99}{99} = \frac{2290}{2290} = \frac{9,89}{9,89} = \frac{10,36}{10,40} = \frac{10,36}{41} = \frac{10,36}{2172} = \frac{10,36}{2,04} = \frac{10,378x - 75,2260}{10,9842} = \frac{74}{2249} = \frac{2249}{9,41} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{10,35}{2218} = \frac{10,374x - 75,2260}{72} = \frac{2248}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,89}{8,89} = \frac{10,374x - 75,2260}{10,9842} = \frac{49}{22249} = \frac{2174}{2249} = \frac{10,374x - 75,2260}{10,9842} = \frac{49}{22249} = \frac{2174}{9,41} = \frac{10,374x - 75,2260}{10,9842} = \frac{10,374x - 75,374}{10,974} = 10,374x - 7$
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\frac{25}{2106} \frac{2106}{3,81} \frac{3,52}{3,52}$ $4 0,0378x - 76,0513 0,9834 = \frac{55}{2214} \frac{7,57}{7,64} \frac{7,64}{99} \frac{99}{2290} \frac{2290}{9,89} \frac{9,89}{10,36} \frac{10,51}{90} \frac{89}{2286} \frac{2286}{9,89} \frac{9,89}{10,36} \frac{10,36}{44} \frac{90}{2172} \frac{2287}{5,71} \frac{9,89}{6,05} \frac{10,40}{44} \frac{41}{2066} \frac{1,72}{2,04} \frac{2,04}{44} \frac{74}{2066} \frac{2249}{1,72} \frac{9,41}{2,04} \frac{8,89}{11} \frac{10,033}{2063} \frac{1,72}{1,72} \frac{1,93}{1,93} \frac{35}{2169} \frac{5,71}{5,71} \frac{5,89}{5,89} \frac{72}{72} \frac{2248}{2248} \frac{9,41}{9,41} \frac{8,85}{8,85} \frac{67}{67} \frac{2218}{2218} \frac{7,57}{7,73} \frac{7,73}{80} \frac{2249}{2249} \frac{9,41}{9,41} \frac{8,89}{8,89} \frac{10,937}{2249} \frac{10,937}{2249} \frac{10,937}{2249} \frac{10,937}{2248} $
$\frac{4}{4} 0,0378x - 76,0513} 0,9834 = \frac{55}{2214} = \frac{7,57}{7,64} \frac{7,64}{99} = \frac{2290}{2290} = \frac{9,89}{9,89} \frac{10,51}{10,36} \\ - \frac{89}{90} = \frac{2286}{2287} = \frac{9,89}{9,89} \frac{10,36}{10,40} \\ - \frac{41}{41} = \frac{2172}{2172} = \frac{5,71}{5,71} \frac{6,05}{6,05} \\ - \frac{4}{4} = \frac{2066}{2066} = \frac{1,72}{1,72} \frac{2,04}{1,72} \\ - \frac{74}{2249} = \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,89} \\ - \frac{1}{2063} = \frac{2248}{1,72} \frac{9,41}{1,72} \frac{8,89}{1,73} \\ - \frac{35}{2169} = \frac{5,71}{5,71} \frac{5,89}{5,89} \\ - \frac{72}{22248} = \frac{9,41}{9,41} \frac{8,85}{8,89} \\ - \frac{67}{2218} = \frac{2249}{7,57} \frac{9,41}{7,73} \\ - \frac{80}{2249} = \frac{249}{9,41} \frac{9,41}{8,89} \\ - \frac{49}{2174} = \frac{2174}{5,71} \frac{5,71}{6,05} \\ - \frac{67}{2218} = \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,89} \\ - \frac{49}{2174} = \frac{2174}{5,71} \frac{5,71}{6,05} \\ - \frac{67}{2218} = \frac{2249}{7,57} \frac{9,41}{7,57} \frac{8,89}{7,57} \\ - \frac{69}{7,73} = \frac{2249}{9,41} \frac{9,41}{8,89} \\ - \frac{49}{2174} = \frac{2174}{5,71} \frac{5,71}{6,05} \\ - \frac{69}{5,71} \frac{5,99}{5,71} \frac{5,99}{5,71} \\ - \frac{69}{5,71} \frac{5,99}{5,71} \frac{5,99}{5,71} \\ - \frac{69}{5,71} \frac{5,99}{5,71} \frac{5,99}$
$4 0,0378x - 76,0513 0,9834 = \frac{99}{2290} = \frac{2290}{9,89} = \frac{9,89}{10,51} = \frac{99}{2286} = \frac{9,89}{9,89} = \frac{10,51}{10,36} = \frac{90}{2287} = \frac{2286}{9,89} = \frac{9,89}{10,36} = \frac{10,40}{41} = \frac{2172}{2,71} = \frac{5,71}{6,05} = \frac{6,05}{4} = \frac{2249}{9,41} = \frac{9,41}{8,89} = \frac{10,0374x - 75,2260}{11} = \frac{2063}{72} = \frac{10,0374x - 75,2260}{2248} = \frac{10,0374x - 75,2260}{72} = \frac{2248}{2249} = \frac{9,41}{9,41} = \frac{8,85}{67} = \frac{10,0374x - 75,2260}{2218} = \frac{10,0374x - 75,2260}{7,71} = \frac{10,0374x - 75,2260}{80} = \frac{10,0374x - 75,2260}{11} = 10,0374x - 75,0374x -$
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$50,0374x - 75,22600,9842 = \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
$5 0,0374x - 75,2260 0,9842 \frac{1}{72} \frac{2063}{1,72} \frac{1,93}{1,72} \frac{1,93}{5,71} \frac{35}{5,89} \frac{2169}{72} \frac{5,71}{2248} \frac{5,71}{9,41} \frac{5,89}{8,85} \frac{67}{2218} \frac{2248}{7,57} \frac{9,41}{7,73} \frac{8,89}{2249} \frac{2174}{9,41} \frac{5,71}{8,89} \frac{6,72}{2249} \frac{5,71}{5,71} \frac{5,71}{5,72} \frac{5,71}{5,72$
$5 0,0374x - 75,2260 0,9842 \boxed{\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
50,0374x - 75,22600,9842  72  2248  9,41  8,85 67  2218  7,57  7,73 80  2249  9,41  8,89 7,57  7,73 80  2249  9,41  8,89 7,57  7,73 80  2249  9,41  8,89 7,57  7,73 80  2249  9,41  8,89 7,57  7,73 80  2249  9,41  8,89 7,57  7,73 80  2249  9,41  8,89 7,57  7,73 80  2249  9,41  8,89 7,57  7,57  7,57 7,57  7,57  7,57 7,57  7,57  7,57  7,59 7,57  7,57  7,59 7,57  7,57  7,59 7,57  7,57  7,59 7,57  7,59  7,
67         2218         7,57         7,73           80         2249         9,41         8,89           48         2174         5,71         6,02
80 2249 9,41 8,89
40 2174 571 602
$4\delta$ $21/4$ $5,16,03$
56 2214 7,57 7,54
5 2066 1.72 1.97
6 0,0376x - 75,7082 0,9833 12 2069 1,72 2,09
96 2290 9,89 10,40
28 2107 3,81 3,52
23 2105 3.81 3.33
98 2290 9.89 10.32
31 2108 3.81 3.45
/ 0,03/8x - /6,23/1 0,9838 14 2070 1.72 2.01
30 2108 3.81 3.45
100 2291 9.89 10.36

Tabela 2: Validação cruzada k-fold - Montagem 2

	D		<b>C1</b>	Respectiva		
k	Regressao	$R^2$	Subconjunto	indicação associada	$U_{real}$	0 <sub>med</sub>
	linear		aleatorio	[1 x 0,2 μs]	[%]	[%]
			42	2173	5,71	5,99
			58	2215	7,57	7,57
0	0 0277 75 0219	0 0927	62	2217	7,57	7,65
8	0,0377X - 75,9318	0,9837	87	2286	9,89	10,25
			88	2286	9,89	10,25
			43	2173	5,71	5,99
			29	2108	3,81	3,45
			60	2216	7,57	7,51
0	0,0376x - 75,8149	0,9837	97	2290	9,89	10,29
9			50	2175	5,71	5,97
			8	2068	1,72	1,94
			36	2170	5,71	5,78
			71	2248	9,41	8,83
			95	2290	9,89	10,41
10	0,0377x - 75,9237	0 0020	92	2288	9,89	10,33
10		0,9839	10	2068	1,72	2,04
			63	2217	7,57	7,66
			21	2103	3,81	3,36
			64	2217	7,57	7,66
	0,0376x - 75,6962		68	2218	7,57	7,70
11		0,9842	78	2249	9,41	8,87
11			24	2105	3,81	3,45
			49	2174	5,71	6,05
			65	2218	7,57	7,70
			66	2218	7,57	7,55
			19	2103	3,81	3,24
12	0 0275 x 75 6225	0 0020	57	2214	7,57	7,40
12	0,0575X - 75,0255	0,9838	3	2065	1,72	1,81
			77	2249	9,41	8,71
			37	2170	5,71	5,75
			26	2106	3,81	3,44
			34	2110	3,81	3,58
12	0 0274x 75 2202	0 0842	82	2250	9,41	8,82
13	0,0374x - 75,5295	0,9642	83	2250	9,41	8,82
			73	2248	9,41	8,75
			9	2068	1,72	2,01
			46	2174	5,71	5,98
			51	2175	5,71	6,02
14	0 0375x = 75 5/38	0 98/15	22	2104	3,81	3,36
14	0,03734 - 73,3430	3 0,9845	85	2251	9,41	8,87
			84	2250	9,41	8,83
			40	2172	5,71	5,91

1-	Regressão	<b>D</b> <sup>2</sup>	Subconjunto	Respectiva	Ureal	Umed
K	linear	<i>R</i> <sup>2</sup>	aleatório	indicação associada $[1 \ge 0.2 \ \mu s]$	[%]	[%]
			54	2214	7,57	7,61
		0,9842	27	2107	3,81	3,58
15	0,0377x - 75,8571		47	2174	5,71	6,10
15			61	2216	7,57	7,69
			101	2292	9,89	10,55
			76	2249	9,41	8,93
	0,0375x - 75,5760	0,9834	20	2103	3,81	3,29
			2	2064	1,72	1,82
16			52	2212	7,57	7,37
10			15	2070	1,72	2,05
			38	2171	5,71	5,84
			45	2173	5,71	5,91
			16	2070	1,72	2,02
			102	2293	9,89	10,42
17	0.0377 x = 76.0240	0 08/0	91	2287	9,89	10,20
1/	0,0377X - 70,0240	0,9840-	32	2109	3,81	3,49
			69	2247	9,41	8,69
			93	2289	9,89	10,27