

### UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

## DANIEL FERRER BERQUÓ

# INFLUÊNCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE ALTA INTENSIDADE EM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

NITERÓI 2021

#### UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

### DANIEL FERRER BERQUÓ

# INFLUÊNCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE ALTA INTENSIDADE EM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. D.Sc. Felipe Sass

Co-orientador: Prof. D.Sc. Marcio Zamboti Fortes

NITERÓI

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE Gerada com informações fornecidas pelo autor

B482i Berquó, Daniel Ferrer INFLUÊNCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE ALTA INTENSIDADE EM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA / Daniel Ferrer Berquó ; Felipe Sass, orientador ; Marcio Zamboti Fortes, coorientador. Niterói, 2021. 77 f. : il. Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.04469932639 1. Energia elétrica. 2. Produção intelectual.I. Sass, Felipe, orientador. II. Fortes, Marcio Zamboti, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título. CDD -

Bibliotecário responsável: Sandra Lopes Coelho - CRB7/3389

#### DANIEL FERRER BERQUÓ

### INFLUÊNCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE ALTA INTENSIDADE EM MEDIDORES DE ENERGIA ELÈTRICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

telize Sam

**Prof. Dr. Felipe Sass** - Orientador Universidade Federal Fluminense - UFF

have Ember fit

Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes - Coorientador Universidade Federal Fluminense - UFF H-r J. H. Henriques hotenriques@id.uff.br:54834481700

Universidade Federal Fluminense - UFF

**Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder** Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

> Niterói (fevereiro/2021)

"A good scientist is a person with original ideas. A good engineer is a person who makes a design that works with as few original ideas as possible". - Freeman Dyson

# Agradecimentos

Agradeço à minha mãe Maria Carmen pelo incentivo e carinho ao longo de toda a minha jornada. Agradeço à minha irmã pelo companheirismo.

Agradeço a minha namorada Helena, pelo apoio e carinho.

Agradeço a dedicação e paciência do meu orientar Felipe Sass e do meu co-orientador Márcio Zamboti, durante as fases de concepção desse estudo. Muito obrigado pelo exaustivo trabalho de revisão do texto e correção.

Ao Cepel, pela oportunidade de realizar o mestrado e pela infraestrutura dos laboratórios.

Aos meus colegas do Cepel, Luiz Grillo e Luiz Fernando (Mineiro), pelo apoio e orientação durante os estudos e ensaios.

A todos os professores e funcionários do PPGEET da UFF.

## Resumo

A redução das perdas de energia elétrica é algo que as concessionárias distribuidoras de energia elétrica buscam diariamente. Exitem dois tipos de perdas de energia, as perdas técnicas e as perdas não técnicas. As perdas técnicas são aquelas em que a energia transmitida é transformada em calor, como as perdas por aquecimentos nos equipamentos, nos transformadores ou mesmo nos cabos de distribuição, esse fenômeno é chamado de perdas por efeito joule. Estas perdas são reduzidas pela substituição de equipamentos com baixa eficiência por outros mais eficientes ou até mesmo por modificações na topologia das redes de distribuição, dentre outros. As perdas não técnicas estão relacionadas a irregularidades nas instalações consumidoras. Dentre elas destaca-se o furto de energia elétrica, que se caracteriza por diferentes conexões que objetivam fraudar o sistema de medição ou se conectar à rede elétrica de forma direta. As perdas totais anuais, no Brasil, chegaram à ordem de 6,6 bilhões em 2018. Neste trabalho é analisado um caso específico de perda não técnica que consiste em se utilizar ímãs que possuem elevados campos magnéticos, na ordem de 0,5 tesla (T), com o intuito de se reduzir o valor de energia mensurado por medidores eletrônicos de energia para fins de faturamento. E analisado o efeito dos campos magnéticos de alta intensidade em elementos de medição de corrente elétrica, utilizados nos medidores de energia, sua caracterização, os erros e possíveis soluções para mitigar os efeitos nocivos aos medidores de energia. Como resultado, verifica-se que alguns medidores são afetados pelos campos magnéticos e outros não e que uma mudança na engenharia dos medidores ou reformulação das normas vigentes se faz necessário.

**Palavras-chave**: Sistema de Medição de Energia, Medição de Corrente, Transformador de Corrente, Ímãs.

## Abstract

The reduction of electricity losses is something that the electricity distribution concessionaires seek daily. There are two types of energy losses, technical losses, and nontechnical losses. Technical losses are when the transmitted energy is transformed into heat, such as losses due to heating in equipment, transformers, or even distribution cables. This phenomenon is called losses by the joule effect. These losses are reduced by replacing equipment with low efficiency with more efficient ones or even by modifying the topology of the distribution networks, among others. Non-technical losses are related to irregularities in consumer facilities. Among them, the theft of electricity stands out, characterized by different connections that aim to defraud the measurement system or connect to the electricity grid directly. Total annual losses in Brazil reached 6.6 billion in 2018. In this work, a specific case of non-technical loss is analyzed, which consists of using magnets with high magnetic fields, in the order of 0.5 tesla (T), to reduce the energy value measured by electronic energy meters for billing purposes. The effect of high-intensity magnetic fields on electric current measurement elements used in energy meters is analyzed, their characterization, errors, and possible solutions to mitigate the harmful impact on energy meters. As a result, it appears that some meters are affected by magnetic fields, and others are not and that a change in the engineering of the meters or reformulation of the current standards is necessary.

**Keywords**: Power System Measurements, Current Measurement, Current Transformers, Magnets.

# Lista de Figuras

2.1	Figura ilustrativa de um medidor eletromecânico monofásico: (a) vista frontal e (b) vista superior	6
2.2	Tipos de mostrador de medidor eletromecânico, (a) ponteiro e (b) ciclomé- trico	7
2.3	Vista frontal do caminho dos fluxos magnéticos no medidor eletromecânico.	8
2.4	Torque provocado pela interação dos fluxos magnéticos no medidor eletro- mecânico.	8
2.5	Tipo de mostrador de medidor eletrônico, (a) ciclométrico e (b) digital	10
2.6	Diagrama em blocos do funcionamento do medidor eletrônico	10
2.7	Ciclométrico usado em medidores de energia	11
2.8	Transformador.	12
2.9	Fluxo de Dispersão	14
2.10	Modelo equivalente do transformador	15
2.11	Representação esquemática da ligação do TC	16
2.12	Transformador de corrente no interior de um medidor de energia	16
2.13	Esquema de um <i>shunt.</i>	17
2.14	Medidor de energia com resistor <i>shunt</i>	18
2.15	Efeito hall	18
2.16	Ilustração da topologia construtiva de um sensor de corrente de efeito hall	19
2.17	Sensor hall da Honeywell, dimensões em milímetros. Fonte: Retirado do datasheet do fabricante.	20
2.18	Sensor hall de um medidor de energia	21

2.19	Eletroímã de referência para ensaio da influência da indução magnética ${\rm CC}$	
	de origem externa. Fonte: Inmetro - RTM nº 587 item A.16	22
2.20	Dados de placa do medidor.	23
3.1	Medidor padrão Radian RD-30	27
3.2	MTE PTS 3.3C	28
3.3	Ligação da fonte MTE em um medidor monofásico	28
3.4	Gaussímetro Extech MF100	29
3.5	Arranjo de ímãs.	30
3.6	Foto do conjunto de ímãs.	30
3.7	Linhas do campo magnético do conjunto de ímãs	31
3.8	Ensaio com o arranjo de ímãs	31
3.9	Ensaio do Ímã.	33
3.10	Simulação sem a placa de ferro	33
3.11	Simulação com a placa de ferro	34
3.12	Esquema do ensaio do transdutor de corrente	34
3.13	Ensaio num TC de medidor de energia	35
3.14	Distribuição dos sensores de corrente no medidor.	36
3.15	Ensaio dos medidores de energia.	37
3.16	Ensaio num medidor sem ímã $\ .$	37
3.17	Ensaio num medidor com ímã	38
4.1	Gráfico do erro do TC	42
4.2	Ensaio do transdutor de efeito hall	43
4.3	Gráfico do erro do sensor hall	43
5.1	Etiquetas para detectar campos magnéticos	51
B.1	Unifilar do Ensaio com Carga Não Linear.	60
B.2	Unifilar do Ensaio com Carga Não Linear com o Diodo Invertido	62

# Lista de Tabelas

2.1	Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: RTM n <sup>o</sup> 587 item A.16	23
2.2	Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: IEC 62053-21:2016	24
2.3	Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: CBIP	25
2.4	Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: CBIP	25
3.1	Ensaio do arranjo de ímãs	32
3.2	Ensaio de exatidão.	38
4.1	Ensaio TC tipo janela usado em medidor eletrônico de energia	41
4.2	Ensaio do transdutor de corrente de efeito hall.	44
4.3	Características dos medidores ensaiados.	45
4.4	Ensaio dos Medidores Eletrônicos Monofásicos	46
4.5	Ensaio dos Medidores Trifásico Eletrônico.	47
4.6	Ensaio dos mostradores - Medidores Monofásicos.	48
4.7	Ensaio dos mostradores - Medidores Trifásicos	48
A.1	Ensaio do medidor eletromecânico monofásico	59
B.1	Ensaio do Medidor 1 com Carga Não Linear	61
B.2	Ensaio do Medidor 2 com Carga Não Linear	61
B.3	Ensaio do Medidor 1 com Carga Não Linear, Diodo Invertido	62
B.4	Ensaio do Medidor 2 com Carga Não Linear, Diodo Invertido	63

# Lista de Abreviaturas e Siglas

IEC	International Electrotechnical Commission
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica1
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro1
GESEL	Grupo de Estudo do Setor Elétrico1
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas2
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia4
RTM	Regulamento Técnico Metrológico 4
PLC	Power Line Communication
GPRS	General Packet Radio Service
TC	Transformador de Corrente
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Intelectual
LCD	liquid crystal display11
PRORET	Procedimento de Regulação Tarifária2
PRODIST	Procedimento de Distribuição4
f.e.m	Força eletromotriz
CBIP	Central Board of Irrigation & Power
IEC	International Electrotechnical Commission
Dimel	Divisão de Supervisão Metrológica44
GLD	Gerenciamento pelo Lado da Demanda10

# Sumário

1	Intr	odução		1
	1.1	Motiv	ação	2
	1.2	Organ	iização do Texto	3
2	Fune	dament	ação Teórica	4
	2.1	Medid	lores de Energia: Princípio de funcionamento	4
		2.1.1	Medidor eletromecânico	5
		2.1.2	Princípio de Funcionamento do Medidor eletromecânico	6
		2.1.3	Medidor Eletrônico	9
	2.2 Tipos de Mostradores			
		2.2.1	Mostrador Analógico	11
		2.2.2	Mostrador Digital	11
	2.3	Sensor	res de Corrente	12
		2.3.1	Transformador de Corrente (TC)	12
		2.3.2	Sensor de Corrente Shunt	17
		2.3.3	Sensor de Efeito Hall	18
	2.4	Influê	ncia de ímãs permanentes em Medidores de Energia	21
		2.4.1	Normas Brasileiras e Internacionais	21
	2.5	Consid	derações Finais	24
3	Met	odologi	a	26
	3.1	Os equ	uipamentos utilizados	26

		3.1.1	Medidor padrão	27
		3.1.2	Fonte	27
		3.1.3	Medidor de campo magnético	28
		3.1.4	Fonte de Campo Magnético	29
			3.1.4.1 Ensaio com o arranjo de ímãs	29
			3.1.4.2 Análise por elementos finitos do conjunto de ímã s $\ldots$ .	31
	3.2	Ensaid	o dos Transdutores de Corrente	32
	3.3	Ensaic	o dos Medidores Eletrônicos de Energia	35
		3.3.1	Determinação do posicionamento dos ímãs em relação aos medidores	35
		3.3.2	Ensaio de Exatidão dos Medidores	36
		3.3.3	Ensaio dos Mostradores	39
	3.4	Consid	lerações Finais	39
4	Aná	lise dos	Resultados	40
	4.1	Ensaic	o dos Transdutores de Corrente	40
		4.1.1	Ensaio do TC usado em medidores eletrônicos de energi a $\ .\ .\ .$ .	40
		4.1.2	Ensaio do Sensor Hall	42
	4.2	Ensaio	o dos Medidores Eletrônicos de Energia	43
		4.2.1		
			Características dos Medidores Ensaiados	44
		4.2.2	Características dos Medidores Ensaiados	44 45
		4.2.2	Características dos Medidores Ensaiados	44 45 45
		4.2.2	Características dos Medidores Ensaiados         Ensaio de Exatidão dos Medidores         4.2.2.1       Medidores Monofásicos         4.2.2.2       Medidores Trifásicos	<ul> <li>44</li> <li>45</li> <li>45</li> <li>46</li> </ul>
		<ul><li>4.2.2</li><li>4.2.3</li></ul>	Características dos Medidores Ensaiados	<ul> <li>44</li> <li>45</li> <li>45</li> <li>46</li> <li>47</li> </ul>
		<ul><li>4.2.2</li><li>4.2.3</li></ul>	Características dos Medidores Ensaiados	<ul> <li>44</li> <li>45</li> <li>45</li> <li>46</li> <li>47</li> <li>47</li> </ul>
		<ul><li>4.2.2</li><li>4.2.3</li></ul>	Características dos Medidores EnsaiadosEnsaio de Exatidão dos Medidores4.2.2.1Medidores Monofásicos4.2.2.2Medidores TrifásicosEnsaio dos Mostradores4.2.3.1Medidores Trifásicos4.2.3.2Medidores Trifásicos	<ul> <li>44</li> <li>45</li> <li>45</li> <li>46</li> <li>47</li> <li>47</li> <li>48</li> </ul>

5	Soluções comerciais			
	5.1	Etiqueta para indicação de campo magnético	50	
	5.2	Proposta de Medidor da <i>Texas Instruments</i>	51	
	5.3	Sensor Eletrônico para Detecção de Campos Magnéticos	51	
	5.4	Localização de Perdas Não Técnicas	52	
	5.5	Blindagem Magnética	52	
	5.6	Considerações Finais	52	
6	Conclusão			
	6.1 Trabalhos futuros			
		6.1.1 Desenvolvimento de Novos Transdutores	54	
		6.1.2 Aperfeiçoamento dos Atuais Medidores	54	
Re	Referências			
Ap	Apêndice A - Ensaio em medidor eletromecânico monofásico			
Ap	Apêndice B – Ensaio com carga não linear			

# Capítulo 1

# Introdução

As concessionárias distribuidoras de energia elétrica no Brasil e no mundo, têm buscado maneiras de reduzir suas perdas não técnicas. No Brasil, um dos incentivos para essa redução se justifica pela ação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) que cobra das concessionárias a melhoria dos indicadores relacionados às perdas não técnicas, pois isso influencia diretamente no reajuste e revisão tarifária.

As perdas de energia na distribuição, de forma simples, podem ser definidas como a diferença entre a energia injetada na rede da concessionária e a energia faturada pela mesma. Desta diferença, pode-se classificar essas perdas em duas, as perdas não técnicas e as perdas técnicas. As perdas técnicas são aquelas em que a energia transmitida é transformada em calor, por exemplo, pelo aquecimento dos condutores, nas correntes de magnetização dos transformadores, dentre outros. Essas perdas são conhecidas e podem ser reduzidas, por exemplo, pela substituição de equipamentos antigos por outros modernos e mais eficientes ou por estudo de configuração da rede e compensação de reativos conforme reportado em [1]. Já as perdas não técnicas, dentre outras, estão relacionadas ao furto e fraude no sistema de energia elétrica [2]. Essas perdas representam, em grande parte das distribuidoras, a maior parcela e têm sido estudadas diferentes ações para sua mitigação como: tarifa social, sistema pré-pago de energia, medição eletromecânica nos transformadores e denúncia em veículos de imprensa [3].

Dentre os fatores que impactam no aumento das perdas não técnicas, pode-se destacar as crises econômicas que provocam um aumento do desemprego e a redução do poder aquisitivo. Em um estudo do Grupo de Estudo do Setor Elétrico (GESEL) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), reporta-se que áreas com elevados índices de criminalidade e com elevada complexidade social, como em algumas regiões do Rio de Janeiro, que são controladas por milícias [2], registram os maiores índices de perdas não técnicas. Existem inúmeras formas de se furtar energia elétrica, como a ligação direta de uma das fases sem passar pelo medidor conhecida como "jump" ou "by-passing", a adulteração do medidor com a queima de um dos elementos de medição de corrente ou de tensão, dentre outras inúmeras formas [4]. A grande maioria dessas técnicas deixa, de alguma forma, marca ou vestígio que houve o furto ou fraude de energia no medidor.

Por outro lado, as técnicas para adulteração do valor medido pelos medidores de energia elétrica para faturamento têm se tornados mais engenhosas. Dentre as diversas técnicas existentes, uma específica não produz qualquer tipo de "marca" ou mesmo algum tipo de prova material que indique tal tentativa. A utilização de ímãs de elevados campos magnéticos, na ordem de 0,5 T, tem se tornado comum e largamente difundida na internet [5]. Esse valor é mil vezes maior que um medidor de energia tem que suportar como especificado pela norma NBR14520:2011[6] da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

### 1.1 Motivação

Mesmo com o avanço da tecnologia dos medidores de energia, que hoje têm sido preferencialmente instalados, nos grandes centros, os digitais substituindo os eletromecânicos, dotados de dispositivos e mecanismos para evitar adulteração ou mesmo os *smart meters* que são a tecnologia mais recente, as concessionárias de energia vêm perdendo receita devido às fraudes em seus sistemas de medição e furto de energia elétrica.

Devido à peculiaridade desse tipo de ação sobre o medidor, e sua rápida divulgação pela internet, as concessionárias de energia ficam defasadas no combate às perdas de energia. Mesmo a indústria necessita de um tempo para analisar esse tipo de intervenção nos medidores, devido ao tempo que a informação é registrada pela concessionária e repassada aos fabricantes para posteriormente estudar a melhor solução para o problema. Quase sempre a sociedade como um todo sai perdendo, pois parte dessa energia que é desviada é cobrada dos assinantes das distribuidoras, como previsto no Procedimento de Regulação Tarifária (PRORET) - Submódulo 2.6 da Aneel.

Por outro lado, a academia é o lugar apropriado para avaliar, analisar e propor soluções para mitigar esse tipo de problema, para que a sociedade não seja penalizada por esse tipo de ação, como aumento da tarifa. Neste contexto que este trabalho visa a contribuir apresentando e propondo soluções.

### 1.2 Organização do Texto

Este documento está dividido em 5 capítulos, contando com este capítulo de introdução.

- No capítulo 2, Fundamentação Teórica, é apresentada uma revisão da literatura sobre elementos de medição de corrente, bem como sua aplicação em medidores de energia elétrica. Serão avaliadas as normas para aprovação dos medidores no Brasil e será feita uma comparação com outras normas de outros países.
- No capítulo 3, Metodologia, são apresentados os ensaios aos quais são submetidos os medidores de energia elétrica no Brasil e no mundo e uma outra metodologia será apresentada para avaliar os medidores de energia.
- No capítulo 4, Análise dos Resultados, são apresentados, com base na metodologia apresentado no capítulo 3, os ensaios dos medidores de energia e dos transdutores de corrente utilizados nos medidores.
- No capítulo 5, Soluções Comerciais, são apresentas algumas soluções comerciais para mitigação do problema causado pelos ímãs nos medidores de energia.
- No capítulo 6, Conclusão, são apresentados as conclusões da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo, será realizada uma revisão da literatura sobre as diferentes técnicas de medição de corrente empregadas em medidores de energia elétrica para faturamento, seus princípios físicos e aspectos construtivos. Serão apresentadas as normas brasileiras que os fabricantes e distribuidores de medidores de energia elétrica para faturamento são submetidos para aprovação e comercialização e, por fim, estas normas serão comparadas com outras normas utilizadas na Índia e na Europa.

### 2.1 Medidores de Energia: Princípio de funcionamento

O medidor de energia elétrica é o elemento final do sistema de distribuição, permite a marcação do consumo de energia do assinante do sistema e a correta cobrança pelo agente que distribui essa energia. Para ser utilizado para fins de faturamento, a Aneel estabelece no modúlo 5 do Procedimento de Distribuição (PRODIST) [7] que o medidor de energia deve atender à regulamentação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), ou, na sua inexistência, às normas da ABNT.

No Brasil, o Inmetro, criado pela Lei n<sup>o</sup> 5.966, de 11 de dezembro de 1973, que é o órgão do governo encarregado para homologação e ensaios dos medidores a serem comercializados em território nacional, é o órgão máximo responsável pela metrologia legal, científica e industrial em todo território nacional. O Inmetro, através do Regulamento Técnico Metrológico (RTM) n<sup>o</sup> 587 [8] estabelece os procedimentos de ensaios para aprovação e comercialização de medidores eletrônicos, e a ABNT, através da norma NBR 14520:2011 [6] - Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica - Método de Ensaio, estabelece as normas para ensaio de medidores. Atualmente as empresas distribuidoras de energia possuem instalados em campo dois tipos de medidores de energia, os eletromecânicos e os eletrônicos. O eletromecânico é uma tecnologia mais antiga, tem como princípio de funcionamento a indução de um disco de alumínio que gira proporcionalmente à potência consumida pela carga à qual está conectada [9]. Este disco movimenta um conjunto de engrenagens para contabilizar a energia consumida, o watt-hora. O disco de alumínio se movimenta sobre a influência do campo magnético proveniente da passagem da corrente, da carga, pela bobina de corrente e pelo campo magnético da bobina de potencial. O medidor eletrônico possui um circuito eletrônico que contabiliza a energia consumida através de transdutores de corrente (*shunt*, transformador de corrente, efeito *hall*, dentre outros) e transdutores de tensão (divisor resistivo, transformador de potencial, dentre outros).

A evolução dos medidores de energia eletrônicos são os *smart meters* ou medidores inteligentes, com capacidade de comunicação com os centros de controle das distribuidoras utilizando diferentes tecnologias como *Power Line Communication* (PLC), *ethernet*, redes sem fio como ZigBee, *Bluetooth*, *General Packet Radio Service* (GPRS). Outras vantagens dos *smart meters* são, segundo [10], a disponibilidade das informações de consumo para os assinantes permitindo que se adaptem ao consumo de energia quando há precificação diferenciada da energia durante o dia, monitoração em tempo real do medidor pela distribuidora de energia reduzindo os custos operacionais e reduzindo os erros e a redução das perdas de energia.

### 2.1.1 Medidor eletromecânico

O medidor de energia eletromecânico é um medidor de tecnologia mais antiga quando comparado com o eletrônico. Tem como princípio de funcionamento a indução magnética aplicada sobre um disco metálico de alumínio [11]. Na figura 2.1 tem-se o esquemático de um medidor monofásico, onde são apresentadas as vistas frontal e superior. A bobina de potencial ou de tensão  $(B_P)$  é constituída por um condutor fino de cobre com elevado número de espiras, está sempre energizada e sua ligação é em paralelo com o circuito ou carga a ser medida. A bobina de corrente  $(B_C)$  é constituída por poucas espiras de fio grosso de diâmetro compatível com a corrente máxima do medidor; sua ligação é em série com o circuito ou carga a ser medida; é dividida em duas meias bobinas com sentido do seu enrolamento contrário uma da outra. O ímã permanente tem como objetivo induzir um conjugado frenador no disco de alumínio. O núcleo é constituído de material laminado ferromagnético e as placas são justapostas, com o objetivo de reduzir as perdas

#### por corrente de Foucault.



Figura 2.1: Figura ilustrativa de um medidor eletromecânico monofásico: (a) vista frontal e (b) vista superior.

#### 2.1.2 Princípio de Funcionamento do Medidor eletromecânico

O medidor eletromecânico é basicamente um motor onde o torque é proporcional à potência que flui por ele. Se a velocidade do motor for proporcional à potência, o número de rotações do disco será proporcional à energia. Assim, o eixo do disco é conectado a um sistema de engrenagens com a finalidade de contabilizar o número de revoluções do disco para a marcação da energia consumida [12] [13]. O mostrador para a marcação da energia consumida pode ser de dois tipos, ciclométrico ou de ponteiro [11]. Na figura 2.2 tem-se um exemplo desses dois tipos de mostrador.

O medidor de energia eletromecânico tem como princípio de funcionamento o fenômeno conhecido como "fenômeno da interação eletromagnética". Esse fenômeno é o que origina o conjugado motor no disco do medidor [11].

A bobina de tensão  $(B_P)$  e a bobina de corrente  $(B_C)$  estão localizadas de modo a



Figura 2.2: Tipos de mostrador de medidor eletromecânico, (a) ponteiro e (b) ciclométrico.

aplicar seus fluxos magnéticos concentrados em uma parte do disco de alumínio, conforme a figura 2.1. Dessa forma, o fluxo resultante atua apenas em uma parte do disco, fazendo que o mesmo se desloque sempre na mesma direção [13].

Será feita uma análise do princípio de funcionamento do medidor eletromecânico monofásico, considerando uma carga puramente resistiva, ou seja, com fator de potência unitário. Dessa forma a tensão e a corrente estarão em fase.

Na figura 2.3 é demonstrado o caminho percorrido pelo campo magnético em quatro instantes diferentes de tempo. Esses instantes estão relacionados com a variação dos fluxos magnéticos oriundos da  $B_P$  e das  $B_C$ , conforme a figura 2.4.

- 1. No Tempo 1, as curvas do fluxo magnético, da  $B_C$ , estão no ponto zero, consequentemente a taxa de variação do fluxo de corrente é máxima, gerando correntes de Foucault, como mostradas, para os dois pólos de corrente. A curva de fluxo magnético da  $B_P$  está defasada em 90° devido à sua alta indutividade. Como esta curva está negativa, a  $B_P$  desenvolve um polo magnético sul. A interação da corrente de Foucault do disco, na parte central, e do fluxo magnético da  $B_P$  desenvolve uma força à esquerda no disco.
- 2. No Tempo 2, o fluxo da  $B_P$  atingi zero. Sua taxa de variação é máxima, causando correntes de Foucault como mostrado. O fluxo da  $B_C$  atingiu seu valor máximo. Os pólos de corrente norte e sul são produzidos conforme indicado, porque as  $B_C$ são enroladas em direções inversas nos dois pólos. Novamente, a interação do fluxo



Figura 2.3: Vista frontal do caminho dos fluxos magnéticos no medidor eletromecânico.



Figura 2.4: Torque provocado pela interação dos fluxos magnéticos no medidor eletromecânico.

produzido pelas correntes parasitas do disco com o fluxo da  $B_C$  cria um torque no

disco para a esquerda.

- 3. O Tempo 3 é similar ao Tempo 1, defasado em 180°. Neste ponto, a curva de fluxo do campo magnético da  $B_P$  está positiva, produzindo um pólo norte. O fluxo da  $B_C$  está passando por zero, porém sua taxa de variação está na direção oposta, de modo que a direção da corrente de Foucault do disco é revertida em relação à mostrada no Tempo 2. Como o fluxo de tensão e o fluxo de corrente de Foucault do disco estão invertidos na direção, a força resultante do disco ainda está à esquerda.
- 4. O Tempo 4, que está 270° deslocado em relação ao Tempo 1, é semelhante ao Tempo 2. Novamente, a direção do fluxo magnético da B<sub>C</sub> e a corrente de Foucault do disco são invertidos, originando um torque do disco à esquerda.
- 5. No Tempo 5, se inicia novamente o ciclo, igual ao Tempo 1.

Por ser uma tecnologia há mais tempo utilizada no mercado, algumas ações com o intuito de modificar seu funcionamento e assim reduzir a correta marcação da energia consumida são amplamente conhecidas pelas concessionárias de energia elétrica. Como descrito por [14], pode-se citar: desconexão ou queima da bobina de potencial, travamento do disco do medidor, ligação invertida dos condutores das fases e desacoplamento do conjunto de engrenagens do registrador com o eixo do disco.

### 2.1.3 Medidor Eletrônico

Diferente do medidor eletromecânico, o medidor eletrônico funciona com circuitos digitais, microcontroladores e com conversores analógico-digitais (ADC). Os sinais de corrente e tensão são convertidos por transdutores e digitalizados pelos ADCs. Estes dados são processados pelo microcontrolador programado para a finalidade de medidor de energia. O valor da energia medida é exibido, ou em um mostrador ciclométrico, ou em uma tela de cristal liquido (LCD), conforme figura 2.5. Na figura 2.6 tem-se um diagrama em blocos do funcionamento do medidor eletrônico.

Uma vantagem do medidor eletrônico com relação ao eletromecânico é que com pequenas alterações na programação do microcontrolador é possível expandir as grandezas medidas e funcionalidades, sem ter que alterar as características do circuito de medição [15]. Por exemplo, pode-se obter também o valor da potência reativa, o fator de potência, os valores eficazes da tensão instantânea e da corrente instantânea, dentre outros.



Figura 2.5: Tipo de mostrador de medidor eletrônico, (a) ciclométrico e (b) digital.



Figura 2.6: Diagrama em blocos do funcionamento do medidor eletrônico.

O medidor eletrônico possibilitou a criação dos medidores inteligentes (*smart meters*) que são a base das novas infraestruturas chamadas de redes inteligentes (*smart grids*), que possibilitam o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) e a atenuação nos horários de pico que impacta no custo da energia, o deslocamento do horário de consumo e conservação do suprimento de energia [16]. Tornando a rede de distribuição mais robusta e flexível.

### 2.2 Tipos de Mostradores

O mostrador do medidor de energia é o mecanismo pelo qual é feito o registro da energia consumida pelo assinante pela empresa de distribuição de energia elétrica.

### 2.2.1 Mostrador Analógico

O mostrador analógico, dependendo do tipo, é utilizado tanto em medidores eletromecânicos como em medidores digitais. Nos medidores eletromecânicos, o mecanismo do conjunto de engrenagens está diretamente conectado ao eixo do disco. Isso, tanto para o mostrador ciclométrico quanto para o mostrador de ponteiro. A vantagem do mostrador ciclométrico é a facilidade de leitura em comparação com o mostrador de ponteiro em que é necessária a correta observação do sentido de rotação de cada ponteiro.

No medidor eletrônico com mostrador ciclométrico, o funcionamento desse tipo de mostrador é diferente. O circuito eletrônico gera pulsos para o mecanismo do mostrador ciclométrico. Esses pulsos alimentam uma bobina que movimenta um eixo, movendo o conjunto de engrenagens, dessa forma incrementando a contagem no mostrador. Na figura 2.7 tem-se um ciclométrico utilizado em medidores de energia.



Figura 2.7: Ciclométrico usado em medidores de energia.

### 2.2.2 Mostrador Digital

O mostrador digital utilizado atualmente nos medidores de energia é do tipo *liquid* crystal display (LCD). Tem como vantagem o seu baixo consumo de energia e baixo custo de fabricação [17]. É constituído por placa de vidro, placa polarizadora, cristal líquido e placa refletora. Quando uma diferença de potencial é aplicada sobre o cristal líquido, há uma polarização do material que com a luz externa é refletido, dessa forma formando uma imagem [18].

### 2.3 Sensores de Corrente

O sensoriamento de corrente tem como objetivo alimentar instrumentos de medição, controle ou proteção [11]. A grande maioria dos sensores de corrente se baseia no campo magnético oriundo da passagem de corrente no condutor ou na queda de tensão sobre um resistor. Desta forma, os principais sensores de corrente são o Transformador de Corrente (TC), o sensor de efeito *hall* e o sensor *shunt*.

#### 2.3.1 Transformador de Corrente (TC)

Para o entendimento do funcionamento do TC, são apresentados, inicialmente, alguns conceitos do transformador, seu funcionamento e as equações pertinentes.

O transformador é um equipamento elétrico, que não possui partes móveis, que tem como objetivo converter um nível de tensão alternada em outro nível de tensão, mantendo a frequência. É formado basicamente por dois enrolamentos, acoplados magneticamente por um núcleo de ferro laminado, ou seja, são interligados por um campo magnético mútuo. Um dos enrolamentos é chamado de primário, onde geralmente é conectada a fonte de tensão alternada, e o outro secundário, onde geralmente está conectada a carga, conforme indicado na Figura 2.8.



Figura 2.8: Transformador.

A relação entre a tensão do primário e a do secundário é definida pelo número de espiras dos enrolamentos, conforme a equação 2.1:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = a, \tag{2.1}$$

onde  $N_p$  é o número de espiras do enrolamento primário,  $N_s$  é o número de espiras do enrolamento secundário,  $V_p$  é a tensão do primário,  $V_s$  é a tensão do secundário e a é a relação de espiras. Observa-se que nessa equação não estão representadas as perdas no transformador. Essa relação é válida para o transformador ideal, que é um dispositivo sem perdas, um transformador perfeito para explicação didática [19].

Da mesma forma que as tensões dos enrolamentos primário e secundário estão relacionadas pelo numero de espiras, o mesmo é válido para a corrente. Na equação 2.2 tem-se a relação do número de espiras com a corrente,

$$N_p.i_p = N_s.i_s,\tag{2.2}$$

sendo  $i_p$  a corrente primária e  $i_s$  a corrente secundária. A relação de espiras pode ser determinada com base nas correntes também, conforme apresentado na equação 2.3.

$$\frac{i_p}{i_s} = \frac{1}{a}.\tag{2.3}$$

Porém, o transformador real possui perdas. Essas perdas são as perdas por histerese, as perdas por corrente de foucault, as perdas nos condutores dos enrolamentos e as perdas de fluxo de dispersão [19].

As perdas por histerese ou corrente de magnetização estão relacionadas ao núcleo ferromagnético e ocorrem em toda máquina elétrica, como transformadores, motores e geradores. Estas perdas correspondem à energia necessária para orientar os domínios magnéticos do material em cada ciclo de corrente alternada e produzir o fluxo no núcleo da máquina elétrica.

As perdas por corrente de foucault ou corrente parasita ocorrem devido ao fluxo magnético variável no material ferromagnético que induz uma tensão no material e uma corrente induzida aparece circulando. Essa corrente circulando no ferro, que possui uma resistência, dissipa energia na forma de calor. Para reduzir esse tipo de perda, o transformador é construído por finas lâminas, sendo estas isoladas com uma resina, limitando os caminhos para a circulação de corrente.

As perdas no enrolamento estão relacionadas com as resistências dos enrolamentos e pela lei de Ohm  $(R \cdot I^2)$ , que provoca aquecimento no respectivo condutor.

Fluxo de dispersão é um pequeno fluxo magnético que passa através dos enrolamentos, primário e secundário do transformador, porém retorna pelo ar, não sendo concatenado

no núcleo ferromagnético. Dessa forma o fluxo enlaça somente o próprio enrolamento. Na Figura 2.9 é representado o fluxo de dispersão do enrolamento primário, sendo que o mesmo ocorre no enrolamento secundário.



Figura 2.9: Fluxo de Dispersão.

Assim, o transformador real tem seu circuito equivalente conforme a Figura 2.10. Observe que o transformador real é justamente o transformador ideal mais a representação das perdas. Os elementos no modelo equivalente do transformador são:

- $R_p$  Resistência do enrolamento primário ( $\Omega$ )
- $X_p$  Reatância devido à indutância de dispersão do primário ( $\Omega$ )
- $R_c$  Resistência de perdas no núcleo  $(\Omega)$
- $X_m$  Reatância de magnetização ( $\Omega$ )
- $N_P$  Número de espiras do primário
- $N_S$  Número de espiras do secundário
- $R_s$  Resistência do enrolamento secundário ( $\Omega$ )
- $X_s$  Reatância devido à indutância de dispersão do secundário ( $\Omega$ )

O transformador de corrente é similar ao transformador tradicional de potência, ou seja, basicamente dois enrolamentos sobre um núcleo laminado ferromagnético [19]. A diferença é a forma que ele é conectado ao circuito. O TC é classificado como transformador de instrumento segundo a norma ABNT NBR IEC 61869-1:2020 [20]. Existe outro tipo que é o transformador de potencial, porém, não faz parte do escopo deste trabalho. O TC é um transformador que tem seu enrolamento primário conectado em série com o circuito ao qual se pretende medir a corrente e o seu secundário conectado na instrumen-



Figura 2.10: Modelo equivalente do transformador.

tação de medição, controle ou proteção. O primário é geralmente construído com poucas espiras (duas ou três, por exemplo). Há casos em que o próprio condutor do circuito é utilizado como enrolamento primário, por exemplo, em TC do tipo janela, dessa forma o enrolamento primário é considerado como de uma espira. A corrente de secundário é normalmente menor que a corrente do primário e, devido a esse fato, pode-se considerar que ele é um "redutor de corrente" [11].

Diferentemente dos transformadores de potência, em que o secundário pode estar aberto, o TC em funcionamento tem que estar permanentemente com seu secundário curto-circuitado ou com uma impedância conectada igual ou abaixo do valor especificado. Isso evita que surjam tensões elevadas em seus terminais do enrolamento secundário [19].

Para cada tipo de aplicação que o TC é empregado, medição, controle ou proteção, diferentes especificações são impostas, como, suportabilidade à corrente de falta, exatidão, dentre outros fatores conforme descrito na norma ABNT NBR6856:2015 [21].

A Figura 2.11 mostra a representação esquemática da ligação de um TC, onde  $I_1$  é a corrente principal ou corrente de linha que se quer medir e que flui pelo condutor até a carga. Nesse exemplo,  $n_1$  é o primário do TC com uma espira. Já  $I_2$  é a corrente do secundário do TC que está conectado a um instrumento, um amperímetro, sendo que, em geral,  $n_2 > n_1$ . Desta forma a corrente de  $I_2 < I_1$  possibilitando que correntes reduzidas possam circular nos referidos instrumentos.

Um TC ideal apresenta uma corrente no enrolamento secundário de valor igual a corrente de primário, dividido pela sua relação de espiras, conforme apresentado na equação 2.4.



Figura 2.11: Representação esquemática da ligação do TC.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$
(2.4)

No entanto, a corrente de excitação provoca um erro, não linear, pois ela não é constante em módulo e ângulo, em um TC real [11]. Com relação à impedância inserida pelo TC na corrente de linha, pode-se considerar desprezível devido ao fato da corrente que circula no secundário ser menor que a corrente do primário [22].

Na figura 2.12 é apresentado um exemplo de TC, tipo janela, utilizado como sensor de corrente em medidor de energia elétrica. Observa-se que este medidor possui três TCs, ou seja, é um medidor trifásico.



Figura 2.12: Transformador de corrente no interior de um medidor de energia.

### 2.3.2 Sensor de Corrente Shunt

O sensor de corrente *shunt* explora a queda de tensão provocada pela passagem da corrente por um resistor, como ilustrado na figura 2.13. Através da lei de Ohm, pode-se utilizar a equação 2.5,

$$V(t) = R \cdot i(t), \tag{2.5}$$

e fazer uma relação direta e linear da tensão medida com o valor de corrente, tanto em corrente contínua como em corrente alternada de até dezenas de MHz [23]. O resistor shunt é inserido em série com o circuito a ser medido. O valor da resistência shunt é determinado pela corrente máxima, pelo projeto do circuito de aquisição e pela potência dissipada. Desta forma, seu desempenho e eficiência diminuem em elevadas correntes, em função do aquecimento e em baixas tensões devido ao baixo valor da queda de tensão sobre o shunt. O sensoriamento de corrente através do shunt apresenta algumas desvantagens, como: isolação, já que o circuito de medição está no mesmo potencial do shunt; perdas por dissipação de potência no resistor; e sinal de tensão em modo comum [24].



Figura 2.13: Esquema de um *shunt*.

Dentre as diversas ligas metálicas utilizadas para construção do resistor *shunt*, a mais utilizada é a manganina, devido à sua baixa resistência e linearidade na temperatura ambiente. A manganina é constituída pela liga metálica de níquel, cobre e manganês e foi inventada por Edward Weston em 1884 [25].

Outra propriedade da manganina é a baixa Força eletromotriz (f.e.m) termelétrica [25] com o cobre, ou seja, na junção da manganina com o condutor de cobre forma-se um termopar. O valor desse termopar cobre-manganina é de aproximadamente 2µV/°C. Dessa forma, o erro introduzido pelo termopar no sistema de medição pode ser desprezado.

Na figura 2.14 é apresentada a placa de um medidor monofásico, que utiliza *shunt*. Essa placa faz parte de um sistema de medição chamado medição centralizada, geralmente instalado no poste de distribuição, conforme patente do Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI) PI 9202095-0 B1 [26].



Figura 2.14: Medidor de energia com resistor shunt.

### 2.3.3 Sensor de Efeito Hall

O sensor de efeito hall se baseia em um fenômeno observado por Edwin H. Hall em 1879 [24]. Quando uma corrente elétrica circula por uma fina lâmina metálica que está inserida em um campo magnético que é perpendicular à mesma, em suas extremidades surge uma diferença de potencial, como ilustrado na figura 2.15.



Figura 2.15: Efeito hall.

A tensão que surge nas extremidades da lâmina metálica é chamada de tensão hall. A tensão que aparece nas extremidades da lâmina é resultado da força de Lorentz, a qual todo elétron que se move dentro de um campo magnético experimenta. Esta força é perpendicular ao campo magnético e à direção do movimento do elétron. O campo magnético que atravessa a lâmina desloca os elétrons que estão em movimento para um dos lados, resultando numa diferença de potencial proporcional à intensidade do campo.

Na prática são utilizados sensores de efeito hall feitos de semicondutores, que possuem uma sensibilidade maior a campos magnéticos quando comparados com os sensores de lâminas metálicas. Os sensores de efeito hall de semicondutores são construídos com tecnologia *Complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS) [27].

Os sensores de efeito hall, geralmente são usados como sensores de posição, rotação [28] ou de proximidade. Outras aplicações para o sensor hall incluem detecção de defeito em cabo de aço [29] e monitoramento da integridade de aço [30].

O sensor hall para sensoriamento de corrente é feito de forma indireta, medindo-se a diferença de potencial provocada pelo campo magnético ao atravessar a pastilha do sensor hall [31].

Para que não haja perda da sensibilidade ou mesmo interferência externa no sensor hall, um núcleo de ferro laminado no formato de toroide é utilizado para auxiliar o sensor. Esse toroide não possui o caminho magnético fechado, dessa forma o seu formato é de um C, formando um entreferro, onde será inserido o sensor hall para que ele fique no caminho do fluxo magnético, conforme ilustrado na figura 2.16. O condutor elétrico, a ser medido, passa pelo centro do toroide.



Figura 2.16: Ilustração da topologia construtiva de um sensor de corrente de efeito hall..

O fluxo magnético deve ser contínuo ao cruzar o entreferro e com a mesma intensidade do fluxo magnético que circula pelo material ferromagnético do núcleo em C. Desta forma, a espessura do entreferro é dimensionada para a menor perda possível a fim de que o fenômeno conhecido como espraiamento seja mínimo.

Se a espessura (d) do entreferro for muito pequena em comparação com as dimensões da face da seção reta do toroide em relação à circunferência do mesmo  $(2 \cdot \pi \cdot r)$ , a densidade de fluxo magnético (B) pode ser aproximada pela equação 2.6,

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r + d \cdot \mu_r},\tag{2.6}$$

onde:

- $\mu_0$  Permeabilidade magnética do vácu<br/>o(H/m)
- $\mu_r$  Permeabilidade magnética do material (H/m)
- I Corrente (A)
- r Raio do Toroide (m)
- d Diâmetro do entreferro (m)

Em geral, segundo [24], os fabricantes produzem o toroide com entreferro para pastilhas hall com espessura na ordem de 1,5 mm. Na figura 2.17, retirado do *datasheet* da *Honeywell*, da série de sensores SS490, pode-se observar que a espessura do sensor hall é de 1,6 mm.



Figura 2.17: Sensor hall da Honeywell, dimensões em milímetros. Fonte: Retirado do *datasheet* do fabricante.

Se for levado em consideração que  $d \cdot \mu_r >> 2 \cdot \pi \cdot r$ , devido à alta permeabilidade do toroide, a equação 2.6 pode ser simplificada para equação 2.7,

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{d}.\tag{2.7}$$

Pode-se observar na equação 2.7 que a espessura do entreferro do toroide controla a densidade de fluxo magnético no mesmo. Também com base na equação 2.7, pode-se calcular o ganho magnético  $(A_M)$  em gauss por ampère, apresentado na equação 2.8,

$$A_M = \frac{\mu_0}{d}.\tag{2.8}$$

Dessa forma, no entreferro de 1,5 mm tem-se um ganho de 8,4 gauss por ampère, conforme a equação 2.9:

$$A_M = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{1, 5 \cdot 10^{-3}} = 837, 8 \cdot 10^{-6} T \approx 8, 4G.$$
(2.9)

Com relação à saída do sinal da pastilha hall, ela pode ser em tensão ou em corrente. Isso depende do fabricante e do circuito interno do sensor hall. Na figura 2.18 é apresentado um exemplo de sensor hall utilizado em um medidor de energia.



Figura 2.18: Sensor hall de um medidor de energia

## 2.4 Influência de ímãs permanentes em Medidores de Energia

Os medidores de energia, sejam eles eletrônicos ou eletromecânicos, possuem sensores de corrente e sensores de potencial. Atualmente, com a facilidade de se adquirir ímãs permanentes de elevados valores de campos magnéticos [5], na ordem de 0,2 a 0,5 T, têm aumentado, em algumas regiões do país, as fraudes por uso desses ímãs com objetivo de reduzir o valor da energia medida pelo medidor. A saturação ou a quase saturação dos sensores de corrente dos medidores e o travamento do mostrador são os efeitos causados pelo ímã.

#### 2.4.1 Normas Brasileiras e Internacionais

Como foi dito no início desse capítulo, para que seja comercializado, um medidor de energia para faturamento deve seguir algumas normas. Será considerado neste estudo
para análise a RTM n<sup>o</sup> 587, do Inmetro [8], a NBR14520:2011, da ABNT [6], no que diz respeito a influência de campos magnéticos estáticos. Os padrões exigidos no Brasil serão comparados com a norma Indiana da *Central Board of Irrigation & Power* (CBIP) de medidores e com a norma europeia da *International Electrotechnical Commission* (IEC).

Dentre os vários requisitos de ensaios que o medidor deve ser submetido, a RTM n<sup>o</sup> 587 no item A.16 – Influência da indução magnética CC de origem externa [8], estabelece os procedimentos para os ensaios e a influência que um medidor tem que suportar de um campo magnético CC de origem externa.

No ensaio é utilizado um eletroímã seguindo as especificações da figura 2.19, retirada da RTM n<sup>o</sup> 587 no item A.16 [8], e esse eletroímã deve ser alimentado com corrente CC. O valor da força magnetomotriz deve ser de 1000 amperes-espiras. O medidor deve ser alimentado com tensão, frequência e corrente nominais e fator de potência unitário. Esses dados estão disponíveis no próprio medidor e podem ser observados na figura 2.20. A metodologia consiste na movimentação de forma aleatória o eletroímã na superfície do medidor abrangendo todas as faces. O medidor será considerado aprovado segundo a tabela 2.1. A norma NBR14520:2011 [6] descreve o mesmo procedimento.



Figura 2.19: Eletroímã de referência para ensaio da influência da indução magnética CC de origem externa. Fonte: Inmetro - RTM n<sup>o</sup> 587 item A.16.

Pode-se observar na tabela 2.1 quatro classes de medidores. Os medidores comercializados no Brasil possuem diferentes classes de exatidão, cada um destinado a uma aplicação. A RTM n<sup>o</sup>587 do Inmetro [8] e a ABNT NBR 14520:2011 [6] classificam a



Figura 2.20: Dados de placa do medidor.

Tabela 2.1: Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: RTM n<sup>o</sup> 587 item A.16.

Condições de onseio	Limites de variação em erro percentual para medidores de índice de classe:				
Condições de clisaio	D	С	В	А	
Sem aplicação do campo	$\epsilon_1$	$\epsilon_1$	$\epsilon_1$	$\epsilon_1$	
Com aplicação do campo	$\epsilon_1 \pm 2,0$	$\epsilon_1 \pm 2, 0$	$\epsilon_1 \pm 2, 0$	$\epsilon_1 \pm 2, 0$	

classe de exatidão dos medidores em quatro classes diferentes. Cada classe recebe uma letra de A a D, sendo os medidores de classe D com menor erro e os A com erro maior. Cada um possui uma aplicação específica, o que é justificado pelo seu custo. A regulamentação dos requisitos mínimos do uso de cada classe de medidor para cada tipo de consumidor é definido pelo Módulo 5 do PRODIST [7].

A norma IEC 62053-21:2016 edição 1.1 [32], no item 8.2.4 que trata do ensaio da influência externa de campo magnético é semelhante a RTM n<sup>o</sup>587 do Inmetro [8] e da norma ABNT NBR 14520:2011 [6]. Um eletroímã com as características construtivas similares da figura 2.19 deve ser alimentado com 1000 amperes-espira. O medidor deve ser alimentado com:

- 50% da corrente máxima;
- tensão nominal;
- fator de potência unitário da frequência fundamental;

- tensão harmônica de 5<sup>a</sup> ordem com 10% da tensão nominal;
- corrente harmônica de 5<sup>a</sup> ordem com 40% da corrente aplicada;
- fator de potência da harmônica unitário.

A tensão fundamental e harmônicas devem estar em fase. O eletroímã deve ser aplicado em toda área do medidor e o mesmo será considerado aprovado de acordo com a tabela 2.2.

Tabela 2.2: Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: IEC 62053-21:2016

Classe do Medidor	Classe 1	Classe 2
Erro	$\pm 3,0$	$\pm 2,0$

Na Índia, quem regula as normas é o Bureau of Indian Standards – BIS, sendo a norma de medidores a IS13779:1999 [33]. Esta norma é similar à brasileira e a europeia, dessa forma não há a necessidade de se avaliar. Será feita uma análise de um documento publicado pelo Central Board of Irrigation & Power – CBIP de 2008 denominado Manual on Standardization of AC Static Electrical Energy Meters [34], onde são feitas recomendações de ensaios mais severos com relação a campos magnéticos estáticos de alta intensidade.

Nos procedimentos descritos no manual da CBIP [34], o medidor é submetido a um campo magnético disperso de 67 mT, proveniente de um eletroímã, que deve ser aplicado em todas as faces do medidor. No entanto esse manual faz referência a campos magnéticos anormais, na ordem de 0,27 T. Com relação ao teste com campo magnético de 67 mT, o medidor será considerado aprovado se o seus erros estiverem de acordo com as tabelas 2.3 e 2.4.

Analisando as três normas citadas [6], [32] e [34] e a RTM [8], observa-se que elas não foram elaboradas para os atuais ímãs permanentes que são comercializados [5], com elevado valor de campo magnético, conhecidos como ímãs de neodímio ou terras raras. Nos próximos capítulos serão analisados os efeitos desses ímãs nos medidores de energia.

### 2.5 Considerações Finais

Este capítulo abordou as técnicas para medição de corrente utilizadas em medidores de energia elétrica para faturamento, seus princípios de funcionamento e as suas principais formas construtivas. As normas técnicas que regulamentam os ensaios dos medidores de

Valor da Corrento	cost	Limite de erro por classe de medidor				
valor da Corrente	$\cos \phi$	1,0		0,2		
$0,01I_n < I < 0,05I_n$	1,0	$\pm 2,0$	$\pm 1, 0$	$\pm 0,4$		
$0,02I_b \le I < 0,05I_b$	1,0	$\pm 2, 0$	$\pm 1, 0$	$\pm 0,4$		
$0,05I_b/I_n < I \le I_{max}$	1,0	$\pm 1, 0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$		
0.02I < I < 0.1I	0,5 ind	$\pm 2, 0$	$\pm 1, 0$	$\pm 0,2$		
$0,02I_n \leq I \leq 0,1I_n$	$0,8  \mathrm{cap}$					
0.05L < I < 0.1L	0,5 ind	$\pm 2, 0$	$\pm 1, 0$	$\pm 0,5$		
$0,001_b \leq 1 \leq 0,11_b$	$0,8  \mathrm{cap}$					
0.1L/L < I < I	0,5 ind	12.0	$\pm 1  0$	$\pm 0.4$		
$0, \Pi_b/\Pi_n \leq \Pi \leq \Pi_{max}$	$0,8  \mathrm{cap}$	$\perp 2, 0$	$\pm 1, 0$	$\pm 0, 4$		
0.1I/I < I < I	0,25 ind	$\pm 2.5$	$\pm 1  0$	$\pm 0.5$		
$0, \Pi_b/\Pi_n \ge \Pi \ge \Pi_{max}$	$0,5 \mathrm{cap}$	$\pm 2, 3$	$\pm 1,0$	$\pm 0, 5$		

Tabela 2.3: Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: CBIP

Tabela 2.4: Limite de variação de erro percentual admissível para medidores de energia ativa. Fonte: CBIP

Valor da Corrento	cost	Limite de erro por classe de medidor			
	$cos\phi$	1,0	$^{0,5}$	0,2	
$0,05I_b/I_n \le I \le I_{max}$	1,0	$\pm 1, 5$	$\pm 0, 6$	$\pm 0,3$	
$0, 1I_b/I_N \le I \le I_{max}$	0,5 ind	$\pm 2,0$	$\pm 1, 0$	$\pm 0,4$	

energia elétrica para faturamento, bem como os respectivos ensaios de aprovação quanto à suportabilidade a campos magnéticos CC externos de alta intensidade, que serão utilizados com base nos ensaios dos capítulos 3, 4 e 5 onde serão apresentadas metodologias, análise de resultados e conclusões, respectivamente.

## Capítulo 3

## Metodologia

Tendo em vista que as normas apresentadas no capítulo 2 não foram elaboradas para os campos magnéticos oriundos dos atuais ímãs encontrados no mercado, foram preparados novos procedimento de ensaios. Comparados aos das normas apresentadas no capítulo 2, esses novos procedimentos são mais severos com o objetivo de avaliar mais detalhadamente os efeitos desse tipo de ímã nos atuais medidores eletrônicos de energia.

Esses novos procedimentos têm como objetivo comparar e validar o desempenho de diversos tipos de medidores com diferentes tecnologias de medição de corrente, desta forma foi criado um roteiro de ensaios em laboratório. Nesse capítulo são abordados os equipamentos utilizados e a metodologia empregada, que é diferente das metodologias apresentadas pelas normas, como visto no capítulo 2.

### 3.1 Os equipamentos utilizados

Para realizar testes e ensaios de exatidão e para avaliar os erros dos medidores de energia, são necessários alguns equipamentos para essa finalidade. Será realizada uma descrição dos equipamentos utilizados nos ensaios e apresentada a metodologia utilizada.

Os equipamentos apresentados foram usados para os dois tipos de ensaios que serão propostos. Eles não representam todos os requisitos necessários para aprovação e homologação do medidor para comercialização. Outros tipos de ensaios, como compatibilidade eletromagnética ou ensaio de aquecimento, bem como outros, são necessários para aprovação e homologação do medidor no mercado nacional, não sendo escopo deste trabalho.

#### 3.1.1 Medidor padrão

Para se realizar os testes nos medidores de energia é necessário um medidor denominado medidor-padrão. A RTM n<sup>o</sup>587 define em 6.4.1 que o medidor-padrão de referência deve ser de exatidão pelo menos três vezes menor que os medidores sobre ensaio. Dessa forma, o padrão utilizado é um fabricado pela Radian modelo RD-30. Esse padrão é trifásico, sua classe de exatidão é de 0,04 %. Na figura 3.1 é mostrado o equipamento.



Figura 3.1: Medidor padrão Radian RD-30.

Os parâmetros que esse equipamento é capaz de medir são Watt-hora - [Wh], voltampere-reativo-hora - [varh], volt-ampere-hora - [VAh], potência reativa hora - [Qh], Tensão - [V], Corrente - [A], Potência - [W], volt ampere reativo - [var], volt-ampere - [VA], volt-hora - [Vh], ampere-hora - [Ah], volt quadrado-hora -  $[V^2h]$ , ampere quadrado-hora -  $[A^2h]$ , ângulo de fase - [°], fator de potência - [fp], frequência - [Hz] e valores máximos e mínimos das medidas - [Max - Min]. Nos ensaios realizados serão utilizados o Wh para aferir os pulsos de calibração gerados pelo medidor e o acumulador de Wh para verificação do mostrador.

#### 3.1.2 Fonte

Para alimentar o medidor com tensão e corrente e, dessa forma, simular uma carga, foi utilizado o equipamento MTE modelo PTS 3.3C. Esse equipamento é uma fonte trifásica programável, com capacidade de gerar tensão senoidal de até 480 V e corrente senoidal de até 120 A, com os ângulos de fase e harmônicos desejáveis. Esse equipamento é chamado também de carga fantasma. Na figura 3.2 tem-se uma foto desse equipamento.

Na figura 3.3 tem-se o esquema simplificado da ligação do MTE num medidor monofásico. Observe que o circuito de corrente e o circuito de tensão são independentes.



Figura 3.2: MTE PTS 3.3C.



Figura 3.3: Ligação da fonte MTE em um medidor monofásico.

#### 3.1.3 Medidor de campo magnético

Para medir o campo magnético, foi utilizado um equipamento denominado gaussímetro. O modelo utilizado foi fabricado pela *Extech Instruments*, modelo MF100. Na figura 3.4 tem-se uma imagem do equipamento. Esse equipamento possui uma sonda com um sensor hall em sua ponta para medição do campo magnético, que é capaz de medir a polaridade do mesmo, em CC e CA de 50 Hz 60 Hz. Dentre as funcionalidades do equipamento estão medição de valores máximos e mínimos, ajuste do valor zero para medidas em CC e indicação de polo norte e sul.

Possui resolução de 0,01 mT na faixa de medição de 300,00 mT e resolução de 0,1 mT na faixa de medição de 3000,00 mT em um ambiente de 23  $^{o}C$  +/- 5  $^{o}C$ .

Esse tipo de equipamento não é mencionado em norma alguma, porém foi observada a necessidade de um para avaliar corretamente o campo magnético ao qual os medidores serão expostos e caracterizar a fonte de campo magnético.



Figura 3.4: Gaussímetro Extech MF100.

#### 3.1.4 Fonte de Campo Magnético

Nesse trabalho, os ímãs permanentes serão explorados como fontes de campo magnético CC por serem portáteis, de baixo custo e fácil obtenção [35] [5]. A tecnologia de ímãs permanentes evoluiu ao longo dos anos até a atual tecnologia dos ímãs de terras raras, que quando comparados com os de ferrite, possuem uma maior densidade de fluxo magnético remanescente [36].

#### 3.1.4.1 Ensaio com o arranjo de ímãs

Os ímãs de terras raras mais comuns no mercado são os constituídos por Neodímio, Ferro e Boro  $(Nd_2Fe_{14}B)$ . São classificados na indústria por uma nomenclatura definida pela letra N e dois números que representam a medida em energia magnética máxima em unidade Mega-Gauss Oersteds (MGOe).

O ímã utilizado nos ensaios, na verdade um arranjo de dois ímãs N52, tem sua construção mostrada na figura 3.5 e sua foto na figura 3.6. Cada ímã possui as seguintes dimensões: largura de 5 cm, comprimento de 5 cm e espessura de 2,5 cm. O conjunto de ímãs, a placa de ferro a alça estão todos unidos por uma resina epoxi preta.

Esse conjunto de ímãs foi fornecido por uma empresa distribuidora de energia elétrica, para se analisar os efeitos causados por ele em medidores de energia. Uma análise em



Figura 3.5: Arranjo de ímãs.



Figura 3.6: Foto do conjunto de ímãs.

laboratório revelou que seu interior possui dois ímãs do tipo N52, já mencionado, e uma placa de ferro com o objetivo de diminuir a relutância magnética do circuito e dessa forma aumentando o fluxo magnético na face oposta em relação a alça, como mostrado na figura 3.7.

Foi avaliado o valor do campo magnético do arranjo apresentado na figura 3.5 em mT em função da distância entre as faces do ímã e a ponteira do gaussímetro. Foi utilizado um conjunto de placas de acrílico com espessuras diferentes, conforme figura 3.8, de modo que se possa variar milímetro a milímetro a distância. Na tabela 3.1 tem-se o resultado do ensaio e o valor da tabela foi plotado no gráfico da figura 3.9.



Figura 3.7: Linhas do campo magnético do conjunto de ímãs.



Figura 3.8: Ensaio com o arranjo de ímãs.

#### 3.1.4.2 Análise por elementos finitos do conjunto de ímãs

Com a finalidade de se avaliar melhor os efeitos causados por esse conjunto de ímãs, foi realizado duas simulações em elementos finitos. A primeira simulação foi feita sem a presença da placa de ferro. Um toroide representando um TC foi colocado a uma distância de 3 centímetros do conjunto de ímãs, conforme a figura 3.10.

Observa-se que o fluxo se dispersa em todas as direções. Isso não promove segurança para quem for manusear esse conjunto, já que qualquer objeto ferromagnético próximo poderia ser atraído tanto na parte superior como na parte inferior do conjunto de ímãs. A densidade de fluxo magnético máximo sobre o toroide foi de 0,45 T.

Distância (mm)	Campo Magnético (mT)
0	586
2	469
3	453
4	435
5	405
6	384
7	371
8	359
9	328
10	316
11	307
12	281
13	270
14	257
15	236
16	220
17	213
18	202
19	189
20	181
21	166
22	160
23	155
24	140
25	133
26	125
27	122
28	112
29	106
30	96
40	56

Tabela 3.1: Ensaio do arranjo de ímãs.

Ao realizar a simulação novamente com a placa de ferro, conforme figura 3.11, observase que o campo magnético na parte superior é quase nulo, dessa forma, dando mais segurança na manipulação. A densidade de fluxo magnético sobre o toroide é maior, quando comparado a simulação anterior, chegando até 0,7 T.

## 3.2 Ensaio dos Transdutores de Corrente

As normas dos medidores de energia não contemplam o ensaio de partes isoladas dos medidores. Dessa forma não existe norma para o ensaio dos transdutores utilizados inter-



Figura 3.9: Ensaio do Ímã.



Figura 3.10: Simulação sem a placa de ferro.

namente nos medidores, só existe norma para transdutores externos quando a medição é indireta, como a norma NBR 6856:2015 [21] para transformadores de corrente.

Desta forma, notou-se a necessidade de se verificar, individualmente, o desempenho de alguns transdutores de corrente utilizados em medidores de energia a fim de avaliar os efeitos causados pelo campo magnético neles.



Figura 3.11: Simulação com a placa de ferro.

Os transdutores de corrente serão testados com CA constante, 15  $A_{rms}$ , e um conjunto de placas de acrílico, com espessura de 1 mm, será usado para variar a distância do conjunto de ímãs do transdutor. Dessa forma, será possível avaliar os efeitos causados pelo ímã em transdutores usados em medidores de energia, variando a distância de um em um milímetro. Na figura 3.12 tem-se um esquemático do ensaio proposto e na figura 3.13, o ensaio sendo realizado num TC usado internamente num medidor de energia.



Figura 3.12: Esquema do ensaio do transdutor de corrente.



Figura 3.13: Ensaio num TC de medidor de energia.

## 3.3 Ensaio dos Medidores Eletrônicos de Energia

Tendo em vista que as normas apresentadas no capítulo 2 não foram idealizados para os campos magnéticos oriundos dos atuais ímãs encontrados no mercado, foram elaborados novos procedimento de ensaios. Comparados aos das normas apresentadas no capítulo 2, esses novos procedimentos são mais abrangentes, pois contemplam os efeitos no ensaio de exatidão e de mostrador, com o objetivo de avaliar mais detalhadamente os efeitos desse ímã nos atuais medidores eletrônicos de energia ou em medidores eletromecânicos.

# 3.3.1 Determinação do posicionamento dos ímãs em relação aos medidores

Foi analisada a distribuição espacial dos sensores de corrente dentro dos quatro medidores trifásicos e se observou em todos os medidores que os sensores de corrente estão localizados na parte traseira. Na figura 3.14 tem-se um esquemático da posição dos sen-



sores de corrente.

Figura 3.14: Distribuição dos sensores de corrente no medidor.

Com base nessa análise, o local escolhido para o posicionamento do ímã será a parte traseira do medidor, próximo dos sensores de corrente. Diferente da norma brasileira NBR 14520:2011 e da RTM n<sup>o</sup>587 do Inmetro, onde o medidor é ensaiado com tensão e corrente nominais e um eletroímã é movimentado aleatoriamente pela superfície do medidor. Neste trabalho, optou-se por realizar o ensaio com o ímã em uma posição fixa, pois quando é utilizado para fins de fraudar o medidor de energia, o ímã se encontra fixo em uma posição.

#### 3.3.2 Ensaio de Exatidão dos Medidores

Será apresentado o roteiro de ensaio para avaliação da exatidão do medidor frente aos campos magnéticos provenientes dos ímãs descritos no item 3.1.4.

Foram utilizados, nesse ensaio, o padrão de energia Radian RD-30, como fonte e carga artificial o MTE PTS 3.3c, e como fonte de campo magnético CC, o arranjo com dois ímãs de neodímio N52 com campo magnético de aproximadamente 0,5 T em sua superfície. Esse valor é mil vezes maior que o valor referenciado em norma técnica, NBR 14520:2011 [6] e na RTM n<sup>o</sup>587 [8]. Na figura 3.15 tem-se o esquema simplificado da montagem do ensaio e nas figuras 3.16 e 3.17, fotos do laboratório onde foram realizados os ensaios num medidor sem o ímã e com o ímã.

O Radian é conectado ao MTE por cabos para medir as tensões de fase e por alicates



Figura 3.15: Ensaio dos medidores de energia.



Figura 3.16: Ensaio num medidor sem ímã

de corrente para medir as correntes. Um sensor óptico é conectado ao medidor para contar os pulsos gerados pelo mesmo e dessa forma o Radian compara a energia registrada por ele com a energia registrada pelo medidor. Previamente o Radian é parametrizado com os valores das constantes de pulso por kWh do medidor.

Diferentemente da norma brasileira e da RTM, que contemplam somente um valor para se realizar o teste de exatidão com campos magnéticos, verificou-se a necessidade de se realizar em pelo menos três pontos para avaliar seus efeitos sobre o medidor. O objetivo é verificar se o resultado poderia ser diferente com os seguintes valores:



Figura 3.17: Ensaio num medidor com ímã

- tensão nominal e 100% da corrente nominal com fator de potência unitário;
- tensão nominal e 100% da corrente nominal com fator de potência indutivo de 0,5;
- tensão nominal e 10% da corrente nominal com fator de potência unitário,

conforme tabela 3.2. Essa tabela foi baseada na tabela 3 da RTM n<sup>o</sup>587 [8] do Inmetro que é usada para avaliar o medidor antes de ser ensaiado. Ela possui mais pontos de ensaio quando comparado com o ensaio de influência de campos magnéticos dessa mesma RTM. Diferentemente da norma brasileira NBR 14520:2011 [6] e da RTM <sup>o</sup>587 [8], onde o medidor é ensaiado com tensão e corrente nominal e um eletroímã é movimentado aleatoriamente pela superfície do medidor, optou-se por realizar o teste em três valores diferentes de corrente para analisar melhor os efeitos do campo magnético e com ímã estacionário.

0% I	cosA	Limites de erro percentuais para medidores com índice de classe					
/0 In	0.050	D	С	В	А		
10	1	$\pm 0,3$	$\pm 0, 6$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$		
100	1	$\pm 0,3$	$\pm 0, 6$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$		
100	0,5 ind	$\pm 0, 4$	$\pm 1, 0$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$		

Tabela 3.2: Ensaio de exatidão.

#### 3.3.3 Ensaio dos Mostradores

O ensaio do mostrador tem como finalidade avaliar se o medidor de energia está registrando de forma correta a energia que ele está medindo. Como o valor que é exibido no mostrador do medidor é o valor acumulado da integração da potência x tempo, a forma de avaliar, neste ensaio, é:

- energizar sem corrente para ver e anotar o atual valor da energia que está no mostrador, quando o medidor possui mostrador de LCD;
- colocar o padrão na opção de ensaio do mostrador;
- ligar o circuito de corrente;
- deixar o sistema ligado por um número de horas preestabelecido;
- ao final entrar com os valores inicias e finais indicados no medidor no padrão para o correto cálculo do erro.

Neste ensaio não é necessária a utilização do contador de pulsos gerado pelo medidor, já que o foco é o valor registrado no mostrador. Para realizar o ensaio do mostrador, foi mantido o arranjo de ímãs na mesma posição do ensaio de exatidão.

### 3.4 Considerações Finais

A metodologia descrita neste capítulo foi elaborada para uma análise mais detalhada dos erros de medição causados por campos externos de valores elevados quando comparados com o valor de referência das normas técnicas. O foco foi nos erros causados pelos ímãs nos tradutores de corrente e os erros causados nos mostradores que impossibilitam a correta marcação do consumo de energia. No próximo capítulo serão discutidos os resultados dos ensaios realizados.

## Capítulo 4

## Análise dos Resultados

A partir dos procedimentos experimentais apresentados no capítulo 3, será realizada uma análise dos erros dos transdutores de corrente, TC e sensor *hall*, e também será feita uma análise dos erros apresentados pelos medidores de energia com relação ao medidor padrão. Será feita uma análise dos erros de exatidão e dos erros do mostrador dos medidores.

Esse capítulo será dividido em tópicos, com os resultados obtidos, para melhor comparação e análise.

### 4.1 Ensaio dos Transdutores de Corrente

Foram avaliados os desempenhos dos transdutores de corrente, perante um conjunto de ímãs de neodímio N52, descritos em 3.1.4. Posteriormente, foram testados um TC retirado de um medidor eletrônico de energia e um sensor de efeito hall para medição de corrente. Não será avaliado o resistor *shunt*, pois ele não sofre influência do campo magnético.

#### 4.1.1 Ensaio do TC usado em medidores eletrônicos de energia

Avaliou-se o desempenho de um TC de medição retirado de um medidor eletrônico de energia. Esse TC é do tipo janela, semelhante ao que foi apresentado na figura 2.12, possui relação de transformação de 1/2500 e erro de -0,1%. Foi observado em todos os medidores ensaiados, que o TCs utilizados são do tipo janela e a relação de transformação é de 1/2500.

O ensaio se inicia com 31 mm de distância dos ímãs em relação ao TC, pois essa é

a menor distância para que o TC não apresente erro. Na tabela 4.1 são apresentados os erros medidos e na figura 4.1 é apresentado graficamente os dados da tabela 4.1.

Tabela 4.1: Ensaio TC tipo ja	nela usado em	n medidor eletrônico	de energia.
-------------------------------	---------------	----------------------	-------------

Distância (mm)	Erro (%)
$78 \sim 31$	0,00
30	-0,05
29	-0,07
28	-0,08
27	-0,08
26	-0,12
25	-0,13
24	-0,13
23	-0,15
22	-0,23
21	-0,25
20	-0,41
19	-0,48
18	-0,73
17	-0,94
16	-30,42
15	-53,78
14	-67,22
13	-67,44
12	-76,33
11	-81,07
10	-82,05
9	-83,59
8	-86,07
7	-86,60
6	-87,05
5	-87,91
4	-88,83
3	-89,47
2	-90,05
0	-91,08

Analisando os resultados obtidos, o TC só apresentou erro de medição a partir de 30 mm de distância em relação à face do conjunto de ímãs. Com base nos ensaios realizados, a fonte de campo magnético a 30 mm de distância gera um campo magnético com valor em torno de 96 mT. Esse valor é superior ao valor da norma brasileira NBR 14520:2011 [6] e da RTM n<sup>o</sup>587 do Inmetro [8]. Dessa forma, pode-se concluir que esse TC ensaiado possui uma imunidade maior a campos magnéticos quando comparado com a norma dos medidores.



Figura 4.1: Gráfico do erro do TC.

Observa-se que a partir de 16 mm o erro foi superior a 30%, ou seja, se estivesse em um medidor de energia já estaria fora da faixa de erro admitido pela norma NBR 14520:2011 [6] e pela RTM n°587 [8].

#### 4.1.2 Ensaio do Sensor Hall

Será avaliado o desempenho de um transdutor de corrente que tem como princípio de medição de corrente o efeito hall. As características desse sensor são:

- Corrente nominal: 50 A,
- Corrente Máxima: 150 A,
- Saída do secundário: em tensão,
- Tensão de alimentação: 15 V e -15 V CC,
- Formato: Tipo janela.

O ensaio seguiu o mesmo procedimento do realizado no TC. Na figura 4.2 tem-se o esquema do ensaio realizado, onde a única diferença em relação ao que foi apresentado na figura 3.12 para ensaios de TCs, é a existência de uma fonte de alimentação para o sensor de corrente de efeito hall. Os resultados deste ensaio são apresentados na tabela 4.2.

Com base nos resultados, pode-se observar que esse transdutor ensaiado possui uma imunidade muito menor a campos magnéticos quando comparado com o TC. Como existem vários fabricantes e modelos diferentes de sensores hall para medição de corrente, os



Figura 4.2: Ensaio do transdutor de efeito hall.

resultados apresentados aqui não podem ser generalizados para todos. Na figura 4.3 é apresentado graficamente os resultado da tabela 4.2.

Observa-se que a partir de 35 mm o erro foi superior a 2,40%, ou seja, se estivesse em um medidor de energia já estaria fora da faixa de erro admitido pela norma NBR 14520:2011 [6] e pela RTM n°587 [8].



Figura 4.3: Gráfico do erro do sensor hall.

## 4.2 Ensaio dos Medidores Eletrônicos de Energia

Serão analisados os resultados de oito amostras de medidores, tendo como base a proposta de ensaios apresentada no tópico 3.3.

Distancia (mm)	Erro (%)
64	0,00
$63 \sim 57$	-0,08
$56 \sim 53$	-0,17
$52 \sim 51$	-0,25
$50 \sim 48$	-0,33
47	-0,41
46	-0,50
45	-0,58
44	-0,66
43	-0,75
42	-0,83
41	-1,16
40	-1,24
39	-1,32
38	-1,49
37	-1,82
36	-1,99
35	-2,40
34	-2,98
33	-3,39
32	-3,81
31	-4,30
30	-5,96
29	-9,85
28	-35,93
27	-54,06
26	-63,49
25	-64,16
24	-64,90
$23 \sim 0$	-99,34

Tabela 4.2: Ensaio do transdutor de corrente de efeito hall.

#### 4.2.1 Características dos Medidores Ensaiados

Foram analisados, ao total, oito medidores de energia. Sendo que quatro medidores são monofásicos e os outros quatro medidores são trifásicos. Na tabela 4.3 tem-se as características dos medidores.

Esses medidores são utilizados por diversas concessionárias distribuidoras de energia elétrica no Brasil, foram aprovados pelo Inmetro, pelas portarias da Divisão de Supervisão Metrológica (Dimel) nº294/2008, nº354/2010, nº399/2008, nº276/2007, nº333/2007, nº023/2016, nº311/2007 e nº312/2007 para comercialização. Por motivos de sigilo, os

Fabricante	Tensão	Corrente nominal	Tipo de	Sensor de	Classe de	Tine
/modelo	nominal	/ corrente máxima	Mostrador	corrente	exatidão	Tipo
1	$127/240 { m V}$	15/100 A	Ciclométrico	Shunt	В	Monofásico
2	$127/240 { m V}$	$15/100 { m A}$	Digital	Shunt	В	Monofásico
3	$127/240 { m V}$	$15/100 { m A}$	Ciclométrico	Shunt	В	Monofásico
4	127/240  V	$15/100 { m A}$	Digital	Shunt	В	Monofásico
5	$127/240 { m V}$	$15/120 \ A$	Digital	TC	В	Trifásico
6	$127/240 { m V}$	$15/120 \ { m A}$	Digital	TC	В	Trifásico
7	127/240  V	$15/120 { m A}$	Digital	Hall	В	Trifásico
8	127/240  V	15/120 A	Digital	TC	В	Trifásico

Tabela 4.3: Características dos medidores ensaiados.

seus nomes e modelos não serão mencionados.

#### 4.2.2 Ensaio de Exatidão dos Medidores

Foram realizados ensaios de exatidão nos oito medidores de energia, seguindo o que foi proposto no item 3.3.2. Para melhor visualização dos resultados, foram separados os ensaios em medidores monofásicos e medidores trifásicos.

#### 4.2.2.1 Medidores Monofásicos

Foram realizados ensaios em quatro amostras de medidores eletrônicos monofásicos de diferentes fabricantes. As características desses medidores são:

- Tensão nominal: 127/240 V;
- Frequência: 60 Hz;
- Corrente nominal: 15 A;
- Mostrador: digital e ciclométrico;
- Classe de exatidão: B.

O conjunto de ímãs foi posicionado na proximidade da face traseira do medidor sobre ensaio, conforme foi demonstrado no item 3.3.1. Na tabela 4.4 tem-se os resultados dos ensaios.

Observa-se pelos resultados, que os medidores monofásicos não foram influenciados pelo campo magnético do ímã. Um dos fatores é que o seu transdutor de corrente é um resistor shunt. Dessa forma, pode-se concluir que do ponto de vista do ensaio de exatidão, sendo feita a leitura dos pulsos gerados pelo medidor, não houve influência do ímã.

	1					
Fabricante	Corrente	Fator de	Erro $(\%)$	Erro $(\%)$	Erro (%)	Mostrador
/modelo	(A)	potência	Sem ímã	Com ímã	Sem ímã	Mostrador
	15	1,0	-0,2	-0,2	-0,2	
1	15	0,5 indutivo	$^{+0,2}$	$^{+0,3}$	$^{+0,3}$	Ciclométrico
	1,5	1,0	-0,2	-0,2	-0,2	
	15	1,0	-0,1	-0,1	-0,1	
2	15	0,5 indutivo	$^{+0,6}$	$^{+0,6}$	+0,7	Digital
	1,5	1,0	-0,2	-0,2	-0,2	
	15	1,0	$^{+0,2}$	$^{+0,2}$	-0,2	
3	15	0,5 indutivo	$^{+1,1}$	$^{+1,1}$	$^{+1,0}$	Ciclométrico
	1,5	1,0	$^{+0,1}$	$^{+0,1}$	$^{+0,1}$	
4	15	1,0	$^{+0,2}$	$^{+0,2}$	+0,2	
	15	0,5 indutivo	+0,7	+0,7	0,0	Digital
	1,5	1,0	0,0	0,0	$^{+0,1}$	

Tabela 4.4: Ensaio dos Medidores Eletrônicos Monofásicos

#### 4.2.2.2 Medidores Trifásicos

Foram realizados ensaios em quatro amostras de medidores eletrônicos trifásicos de diferentes fabricantes. As características desses medidores são:

- Tensão nominal: 127/240 V;
- Frequência: 60 Hz;
- Corrente nominal: 15 A;
- Mostrador: digital;
- Classe de exatidão: B.

O conjunto de ímãs foi posicionado na proximidade da face traseira do medidor sobre ensaio, conforme foi demonstrado no item 3.3.1. Na tabela 4.5 tem-se os resultados dos ensaios.

Observa-se pelos resultados, que três medidores apresentaram erros elevados, quando comparados com os limites previstos pela norma. Os erros foram superiores a  $\pm 2,0\%$ . Somente um medidor não ficou fora do limite de erro.

Com relação ao tipo de transdutor utilizado, as três amostras que ficaram com os erros fora dos limites possuem sensor do tipo TC. A amostra que foi aprovada nos ensaios possui sensor do tipo hall.

						1
Fabricante	Corrente	Fator de	Erro $(\%)$	Erro $(\%)$	Erro $(\%)$	Mostrador
/modelo	(A)	potência	Sem ímã	Com ímã	Sem ímã	MOSTACO
	15	1,0	0,0	-64,5	0,0	
5	15	0,5 indutivo	-0,5	-39,4	$^{+0,5}$	Digital
	1,5	1,0	-0,1	-64,6	-0,1	
	15	1,0	0,0	-98,8	0,0	
6	15	0,5 indutivo	-0,6	-81,3	$^{+0,5}$	Digital
	1,5	1,0	0,0	-98,7	0,0	
	15	1,0	-0,3	-0,9	-0,4	
7	15	0,5 indutivo	-0,4	-0,5	$^{+0,1}$	Digital
	1,5	1,0	-0,3	-1,2	-0,5	
8	15	1,0	0,0	-97,4	0,0	
	15	0,5 indutivo	-0,7	-73,1	$^{+0,7}$	Digital
	1,5	1,0	-0,2	-97,5	$^{+0,1}$	1

Tabela 4.5: Ensaio dos Medidores Trifásico Eletrônico.

Não foi possível obter mais detalhes do tipo de sensor *hall* utilizado pelo medidor  $n^{0}7$ , que não foi influenciado pelo ímã. O medidor foi aberto para um inspeção do sensor hall utilizado, porém não foi encontrado *datasheet* algum na internet com os números do componente.

#### 4.2.3 Ensaio dos Mostradores

Foram realizados ensaios de mostrador nos oito medidores de energia, seguindo o que foi proposto no item 3.3.3. Para melhor visualização dos resultados, os ensaios em medidores monofásicos e medidores trifásicos foram separados.

#### 4.2.3.1 Medidores Monofásicos

Os medidores monofásicos analisados possuem como mostrador para contabilizar e registrar a energia consumida um mostrador ciclométrico ou digital de LCD. Foram ensaiados com a corrente de 60 A e tensão de 220 V por duas horas e trinta minutos, tendo que, ao final, registrar a diferença de 33 kWh. Na tabela 4.6 estão os resultados dos medidores monofásicos ensaiados.

Observa-se que mesmo os medidores tendo sido aprovados nos ensaios de exatidão, um não foi aprovado no ensaio do mostrador. Uma análise mais detalhada revelou que o mecanismo de registro da energia consumida, o registrador ciclométrico, tem o seu mecanismo de acionamento dos dígitos constituído por peças metálicas. Quando comparando com o outro medidor, que também possui mostrador ciclométrico, várias partes que fazem

Fabricante	Tipo de	Erro $(\%)$	Erro $(\%)$	Erro $(\%)$
/modelo	Mostrador	Sem ímã	Com ímã	Sem ímã
1	Ciclométrico	$0,\!1$	-100,0	0,1
2	Digital	-1,23	-1,23	-1,23
3	Ciclométrico	$0,\!1$	-0,1	0,1
4	Digital	-1,24	-1,24	-1,24

Tabela 4.6: Ensaio dos mostradores - Medidores Monofásicos.

o acionamento dos dígitos são de plástico. Dessa forma, o campo magnético do ímã fez o travamento do mecanismo, impossibilitando a correta marcação da energia consumida. Foi observado que o LCD é imune ao campo magnético, não sendo afetado pelo ímã. Dessa forma, somente três medidores foram aprovados em ambos os ensaios.

#### 4.2.3.2 Medidores Trifásicos

Os medidores trifásicos ensaiados possuem somente mostrador do tipo LCD. Foram ensaiados com a corrente de 60 A e tensão de 220 V por três horas e trinta minutos tendo que ao final registrar a diferença de 125,4 kWh. Na tabela 4.7 estão os resultados dos ensaios.

Fabricante	Tipo de	Erro $(\%)$	Erro (%)	Erro (%)
/modelo	Mostrador	Sem ímã	Com ímã	Sem ímã
5	Digital	-0,38	-64,09	-0,41
6	Digital	-0,26	-99,00	-0,36
7	Digital	-0,46	-0,42	-0,43
8	Digital	-0,27	-98,00	-0,29

Tabela 4.7: Ensaio dos mostradores - Medidores Trifásicos.

Mesmo os quatro medidores não possuindo registrador ciclométrico, pois possuem LCD e são imunes ao campo magnético, ainda assim foi realizado o ensaio do mostrador pois, como o campo magnético influencia no transdutor de corrente, o valor mensurado de corrente será menor. Dessa forma o valor contabilizado da energia também será menor que o valor real.

Observa-se que os mesmos três medidores que foram reprovados nos ensaios de exatidão foram reprovados no ensaio do mostrador. Esse resultado já era esperado, já que seus transdutores de corrente não estavam medindo correntemente a corrente quando o campo magnético foi aplicado.

O medidor que passou no ensaio de mostrador e no ensaio de exatidão, foi inspecionado

para avaliar se sua suportabilidade ao campo magnético do ímã é de origem construtiva ou na parte eletrônica de medição. Ao desmontar o medidor, a primeira coisa que foi notado foi o tipo de transdutor de corrente do tipo hall. Não foi possível encontrar o fabricante do sensor hall utilizado bem como o datasheet do componente. Uma hipótese é que esse componente é fabricado e customizado exclusivamente para esse fabricante desse medidor. Outro ponto observado foi que o toroide com entreferro utilizado em cada fase está centralizado de forma equidistante da face frontal e traseira do medidor. A menor distância do toroide para uma das faces, que foi a traseira, foi de 24 mm. Pela tabela 3.1 o valor aproximado do campo magnético seria de 140 mT. Se esse sensor fosse o TC ensaiado no Capítulo 4, seu erro segundo a tabela 4.1 seria de -0,13%, dessa forma estaria dentro do erro admissível se fosse o erro total de um medidor de energia. Assim as duas hipóteses para esse medidor não ter sofrido interferência do campo magnético pode ser ao circuito integrado hall customizado ou a distância do transdutor. Foi observado nos outros três medidores que não foram aprovados nos ensaios de exatidão e de mostrador que seus transdutores de corrente são do tipo TC e estão faceando a parte traseira do medidor, sendo assim a distância do ímã para o medidor de no máximo 3 mm que é a espessura da caixa do medidor.

### 4.3 Considerações Finais

Observa-se que alguns medidores não foram capazes de apresentar um correto funcionamento na presença do ímã. A norma NBR 14520:2011 [6] e a RTM n $^{0}587$  [8] não abrangem todas as formas que o campo magnético pode influenciar o medidor de energia. Neste capítulo, pode-se observar que alguns medidores seriam aprovados nos ensaios de exatidão, porém como foi demonstrado, seriam reprovados no ensaio de mostrador. Outro ponto observado é que uma modificação no arranjo interno dos transdutores de corrente no medidor, poderia auferir maior imunidade a campos magnéticos dos ímãs.

## Capítulo 5

## Soluções comerciais

Neste capítulo serão abordadas algumas soluções comerciais para mitigação ou detecção da utilização de ímãs para redução artificial da energia medida por medidores. Esse problema já relatada e conhecido em outros países [37]. Dessa forma algumas empresas têm desenvolvido algumas soluções para este problema.

## 5.1 Etiqueta para indicação de campo magnético

Algumas empresas têm desenvolvido uma etiqueta que funciona como um lacre e um indicador de aproximação de campos magnéticos [37]. Na figura 5.1 tem-se um exemplo desse tipo de etiqueta. Ao pesquisar esse tipo de solução foram encontrados alguns fabricantes com o mesmo princípio básico de funcionamento. Um conjunto de pequenos ímãs repousa em uma fina camada de metal em perfeito equilíbrio magnético. Quando submetidos a um campo magnético é desfeito o arranjo, dessa forma indicando que houve uma aproximação de campo magnético externo. Esse tipo de etiqueta é utilizado por diversas *utilities*, como companhias de gás, energia e água [37].

Esse tipo de solução tem como desvantagem o raio de proteção da etiqueta e a posição que ela terá que ocupar para ser de fácil visualização. Como demonstrado em posição dos sensores de corrente, os transdutores de corrente estão posicionados na parte traseira do medidor. Alguns testes em laboratório demostraram que essa etiqueta fixada na frente do medidor não é eficaz quando o ímã é utilizado na parte traseira. Dessa forma, não sendo eficiente.



Figura 5.1: Etiquetas para detectar campos magnéticos

### 5.2 Proposta de Medidor da Texas Instruments

A *Texas Instruments* possui uma solução [38] de medidor polifásico para faturamento, que utiliza como transdutor de corrente o resistor *shunt*. Um dos problemas com esse tipo de solução é a falta de isolamento galvânico, já que o potencial das fases está diretamente conectado ao circuito de medição. Por outro lado, o transdutor *shunt* é imune ao campo magnético.

## 5.3 Sensor Eletrônico para Detecção de Campos Magnéticos

O pedido de patente BR1020190132329A2 denominado: Dispositivo Modular, Sistema e Método para Monitoramento de Campos Magnéticos de Alta Intensidade Próximos a Medidores De Consumo, sugere um sistema para detecção e marcação de forma indelével que houve uma tentativa de aproximação de campos magnéticos elevados nas proximidades do medidor de energia. Tem como base a utilização de um *display* de tinta eletrônica (*e*-*ink*) que mesmo sem energia para alimentar a tela, as informações não são apagadas.

### 5.4 Localização de Perdas Não Técnicas

Algumas iniciativas de localizar possíveis locais de perdas não técnicas dentro da área de concessão das distribuidoras de energia tem se mostrado promissor. A utilização de medidores inteligentes enviando dados em tempo real para o centro de controle da distribuidora e comparando com os dados fornecidos pelo alimentador da subestação é uma das formas de se avaliar os possíveis locais com perdas não técnicas [39].

A utilização de estimadores de estado com os dados das campanhas de medição e técnicas de clusterização [40] tem se mostrado eficaz para localização de regiões, dentro da área de cobertura da concessionária, com possíveis perdas não técnicas.

## 5.5 Blindagem Magnética

Em [41] é proposta uma blindagem magnética dos transdutores de corrente. São realizados algumas simulações em elementos finitos e ao final é sugerido um formato de blindagem para proteger o medidor de energia contra os efeitos dos ímãs de neodímio.

### 5.6 Considerações Finais

Existem várias técnicas para detecção e localização de perdas não técnicas. A escolha por parte do agente que distribui a energia elétrica, está ligada a relação custo x benefício poderá trazer para empresa.

## Capítulo 6

## Conclusão

A tecnologia de medição de energia elétrica evoluiu nos últimos anos, dos medidores eletromecânicos para os primeiros medidores eletrônicos até os mais modernos *smart meters*. Contudo, as técnicas para burlar o sistema de faturamento também evoluíram ao longo dos anos, sendo que as mais recentes não deixam qualquer marca no medidor.

Esse trabalho abordou os efeitos causados por campos magnéticos estáticos, oriundos de ímãs de neodímio, em medidores eletrônicos de energia para faturamento, com o foco nos efeitos causados pelos campos magnéticos nos transdutores de corrente.

Foram analisadas e comparadas algumas normas para ensaio e aprovação de medidores de alguns países. Foi demonstrado que as atuais normas não são suficientes para os campos magnéticos dos atuais ímãs encontrados no mercado, quando usados para burlar o sistema de faturamento.

Foram analisadas algumas amostras de medidores de energia e somente alguns medidores foram capazes de suportar o campo magnético, seja pelo tipo de transdutor utilizado, ou alguma técnica que o fabricante aplicou no equipamento para fazê-lo imune a esse tipo de fraude.

Nas amostras de medidores trifásicos analisados, somente 12,5% foram aprovadas no ensaio de exatidão e 12,5% foram aprovados no ensaio do mostrador. E nos medidores monofásicos analisados, 100% foram aprovados no ensaio de exatidão e 75,0% foram aprovados no ensaio do mostrador.

### 6.1 Trabalhos futuros

A busca pelo aperfeiçoamento do sistema de medição, bem como sua inviolabilidade, é algo que a indústria e as concessionárias de energia elétrica buscam diariamente.

Este trabalho é só um começo na análise desse tipo de problema. Alguns fabricantes de semicondutores e alguns centros de pesquisa já realizam estudos nessa área e possuem propostas de solução para problemas de identificação de aproximação de campos magnéticos de origem externa.

O estudo realizado nesta dissertação mostrou a necessidade da revisão por parte da ABNT juntamente com o Inmetro das normas para aprovação dos medidores para faturamento, no mercado nacional. Um grupo de estudo envolvendo as indústrias e as empresas de distribuição os centros de pesquisa e a ABNT com o Inmetro se faz necessário para encontrar soluções para melhoria e segurança dos medidores de energia.

#### 6.1.1 Desenvolvimento de Novos Transdutores

Pesquisa por novas técnicas para medidão de corrente que não sejam ou consigam suportar a influência dos atuais ímãs comerciais. Um protótipo poderia ser desenvolvido em parceria com a universidade, os centros de pesquisa e a indústria.

#### 6.1.2 Aperfeiçoamento dos Atuais Medidores

Um estudo da engenharia dos atuais medidores e propor algumas alterações com a finalidade de mitigação do problema. Dessa forma, poderia aproveitar parte dos atuais projetos dos medidores comerciais.

## Referências

- AMORA, M. A. B.; UFPA, N.; NASCIMENTO, A. C.; UFPA, N.; BEZERRA, U. H.; UFPA, N.; GARCEZ, J. N.; CELPA, R.; MIRANDA, V.; PT, I.; MATOS, M. C.; PT, I.; PINTO, J. L.; PT, I. Redução de Perdas Técnicas em Redes de Distribuição Através da Reconfiguração de Redes e Compensação de Potência Reativa. *II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, n. x, p. 763–767, 2016. Disponível em: <https://bit.ly/3pLuerc>.
- [2] LIGHT, C. Perdas não técnicas : origens e possíveis soluções o Caso Light. Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL) do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/UFRJ), 2019.
- [3] HUBACK, V. B. d. S. Medidas ao Combate a Perdas Elétricas Não Técnicas em Areas com Severas Restrições à Operação de Sistemas de XIII, Distribuição Energia Elétrica. 167,2018. de р. Disponível em: <a href="http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/12">http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/12</a> huback1.pdf>.
- [4] SREENIVASAN, G. Power Theft. Fourth edi. Delhi: Asoke K. Ghosh, PHI Learning Private Limited, 2016. 240 p. ISBN 9788120352810.
- [5] VISENTINI, A. L.; VIEIRA, L. C. Influência de campo magnético externo em medidores de energia elétrica para faturamento. In: . Fortaleza: XXIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2018. p. 8.
- [6] ABNT. ABNT NBR 14520. [S.l.], 2017. 27 p. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.
- [7] ANEEL. Prodist Módulo 5 Sistemas de Medição. Aneel, v. 5, n. March, p. 31, 2017. Disponível em: <a href="https://www.aneel.gov.br/modulo-5">https://www.aneel.gov.br/modulo-5</a>>.
- 8 Instituto Nacional de Metrologia, Q. e. T. I. Portaria Inmetro  $n^{\varrho}$ 587. 2012, sobre requisitos metrológicos de05de novembro detécnicos para medidores eletrônicos deenergia elétrica. 2012.69 Disponível p. em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001929.pdf>.
- [9] AHMAD, M. W.; MOURSHED, M.; MUNDOW, D.; SISINNI, M.; REZ-GUI, Y. Building energy metering and environmental monitoring A state-of-the-art review and directions for future research. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., v. 120, p. 85–102, 2016. ISSN 03787788. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059">http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059</a>>.
- [10] AVANCINI, D. B.; RODRIGUES, J. J.; MARTINS, S. G.; RABÊLO, R. A.; AL-MUHTADI, J.; SOLIC, P. Energy meters evolution in smart grids: A review. *Journal* of Cleaner Production, v. 217, p. 702–715, 2019. ISSN 09596526.

- [11] FILHO, S. d. M. Medição de Energia Elétrica. 4ª edição. ed. Riode Janeiro- RJ: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997. 483 p. ISBN 85-216-1098-X.
- [12] Edison Electric Institute. Handbook for electricity metering. 9th ed. ed. [S.l.]: Edison Electric Institute, 1992. 556 p. ISBN 9780931032301.
- [13] KNOWLTON, A. E. Electric Power Metering A Textbook of Practical Fundamentals. First edit. New York and London: Mc Graw Hill Book Company, 1934.
- [14] MINGUEZ, A. Medidores De Energia Ativa: Funcionamento, Práticas Usuais, Principais Ensaios E Análise Das Fraudes Mais Comuns. p. 80, 2007. Disponível em: <a href="http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf">http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf</a>>.
- [15] BERRISFORD, A. J. A Smarter Meter: IEEE-1459 power definitions in an offthe-shelf Smart Meter. Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, v. 2015-July, p. 830–835, 2015. ISSN 10915281.
- [16] BATALLA-BEJERANO, J.; TRUJILLO-BAUTE, E.; VILLA-ARRIETA, M. Smart meters and consumer behaviour: Insights from the empirical literature. *Energy Policy*, Elsevier Ltd, v. 144, n. June, p. 111610, 2020. ISSN 03014215. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111610">https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111610</a>>.
- [17] KAWASAKI, K.; SAKAYORI, H.; FUJII, T.; LHARA, Y.; KURAMOCHI, O. 12-inch LCD module with 640 x 200 pixels. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, CE-30, n. 4, p. 556–562, nov 1984. ISSN 00983063. Disponível em: <a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/4180317/>">http://ieeexplore.ieee.org/document/4180317/></a>.
- [18] KITAWAWA, K.; TORIYAMA, D. K.; KANUMA, Y. Reliability of Liquid Crystal Display. *IEEE Transactions on Reliability*, R-33, n. 3, p. 213–218, 1984. ISSN 15581721.
- [19] CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5<sup>a</sup> edição. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill - Bookman, 2013. 684 p.
- [20] ABNT. ABNT NBR IEC 61869-1. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 63, 2020.
- [21] ABNT. ABNT NBR 6856. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 111, 2015.
- [22] GRAY, A.; WALLACE, G. A. Eletrotécnica Princípios e Aplicações. 7<sup>a</sup> edição. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1975. 702 p.
- [23] XIAO, C.; ZHAO, L.; ASADA, T.; ODENDAAL, W. G.; Van Wyk, J. D. An Overview of Integratable Current Sensor Technologies. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, v. 2, p. 1251–1258, 2003. ISSN 01972618.
- [24] RAMSDEN, E. Hall-Effect Sensors Theory and Applications. [S.1.]: ELSEVIER, 2006.
- [25] STOUT, M. B. Curso Básico de Medidas Elétricas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1975.

- [26] ALVARENGA, L. M.; CALDAS, R. P.; COSTA, R. S. da; JÚNIOR, A. V. P.; SOUZA, F. C. de; BANDIM, C. J.; PIMENTEL, J. C. G. SISTEMA E PROCESSO PARA MEDIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA REFERENTE A UMA PLURALIDADE DE CONSUMIDORES. INPI, 1994. 69 p. Disponível em: <https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&Cod Pedido=442882&SearchParameter=CEPEL &Resumo=&Titulo=>.
- [27] CHAVES, C. F. Transformador de Corrente Eletrônico Utilizando Bobina de Rogowski e Interface Óptica com Pof para Aplicação em Sistemas de Potência. *COPPE/UFRJ*, p. 98, 2008.
- [28] SU, Y.; FU, G.; WAN, B.; ZHANG, D.; MA, X. Failure analysis of halleffect sensors in brushless DC starter/generator. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 103, n. November 2017, p. 226–237, 2019. ISSN 13506307. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.018">https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.018</a>>.
- [29] LIU, S.; SUN, Y.; JIANG, X.; KANG, Y. Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor. *Measurement*, Elsevier Ltd, v. 171, n. November 2020, p. 108768, 2021. ISSN 02632241. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108768">https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108768</a>>.
- [30] ANGELOPOULOS, S.; MISIARIS, D.; BANIS, G.; LIANG, K.; TSARA-BARIS, P.; KTENA, A.; HRISTOFOROU, E. Steel health monitoring device based on Hall sensors. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Elsevier B.V., v. 515, n. August, p. 167304, 2020. ISSN 03048853. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167304">https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167304</a>>.
- [31] GIRGIN, A.; BILMEZ, M.; AMIN, H. Y.; KARALAR, T. C. A silicon Hall sensor SoC for current sensors. *Microelectronics Journal*, v. 90, n. May, p. 12–18, 2019. ISSN 00262692.
- [32] IEC. *IEC 62053-21*. [S.l.], 2014. 410 p.
- [33] STANDARD, I. IS13779. [S.l.], 1999.
- [34] CBIP. Static Energy Meter Specification & Testing. [S.l.], 2015. v. 53, n. 9, 1689– 1699 p.
- [35] BRITO, L. C. G.; BERQUO, D. F.; BARROS, L. F. P. Avaliação do Desempenho de Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica Influenciados por Campos Magnéticos de Alta Intensidade Ímãs de Neodímio) e Ações Propostas para Redução das Perdas não Técnicas (Comerciais) Produzidas. XXV SNPTEE, p. GDI/05 – 3283, 2019. Disponível em: <a href="https://www.xxvsnptee.com.br/>br/>.</a>
- [36] SOINSKI, M.; RYGAL, R.; PLUTA, W.; KEPSKI, P.; ZUREK, S. Magnetic toroidal cores exposed to a strong stationary magnetic field. *Journal of Electrical Engineering*, v. 57, n. 8 SUPPL, p. 92–95, 2006. ISSN 13353632.
- [37] SOINSKI, M.; RYGAL, R.; PLUTA, W.; KEPSKI, P. Addresing an EMC weakness due to strong static magnetic fields. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 1–6, 2007. ISSN 10774076.
- [38] Texa Instruments. Multi-Phase Energy Measurement With Isolated Shunt. n. August, p. 1–52, 2015.
- [39] FERREIRA, T. S. D.; TRINDADE, F. C. L.; FREITAS, W.; VIEIRA, J. Detecção de Perdas Não Técnicas na Presença dos Medidores Inteligentes. Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, p. 6, 2014.
- [40] DUARTE, D.; KONDO, D.; MATSUZAKI, F.; GUARALDO, J.; SOUZA, M.; SILVA, H.; FERREIRA, M.; SILVA, R.; BRITO, L.; ROSS, R.; KAGAN, N. Identification and evaluation of energy theft using the state estimator in medium-voltage and low-voltage grids with exogenous parameters for planning expansion. *CIRED* -*Open Access Proceedings Journal*, v. 2017, n. 1, p. 2320–2324, 2017. ISSN 25150855.
- [41] DIAHOVCHENKO, I. M.; OLSEN, R. G. Electromagnetic compatibility and protection of electric energy meters from strong magnetic fields. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 186, n. November 2019, p. 106400, 2020. ISSN 03787796. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106400">https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106400</a>>.
- [42] PAWŁOWSKI, E. The influence of a strong external magnetic field from a permanent magnet on a measurement accuracy of an inductive watt-hour meter. *Przegląd Elektrotechniczny*, v. 1, n. 8, p. 72–75, 2016. ISSN 0033-2097.

## APÊNDICE A – Ensaio em medidor eletromecânico monofásico

O foco dessa dissertação foram os medidores eletrônicos monofásicos e trifásicos. Porém, existem em muitas concessionárias de energia no Brasil, medidores eletromecânicos instalados. Dessa forma foi realizado o teste em um medidor eletromecânico monofásico para avaliar os efeitos do conjunto de ímãs nele.

Foi utilizado a mesma metodologia descrita no capítulo 3. Na tabela A.1 tem-se o resultado dos ensaios de exatidão.

Fabricante	Corrente	Fator de	Erro (%)	Erro (%)	Erro (%)	Maatnadan
/modelo	(A)	Potência	Sem ímã	Sem ímã	Sem ímã	Mostrador
Medider	1,5	1,0	-0,18	-30,05	+7,44	
Flotromocânico	15	1,0	+0,38	-27,31	+9,19	Ciclométrico
Eletioniecanico	15	0,5 indutivo	+0,87	-33,76	+9,87	

Tabela A.1: Ensaio do medidor eletromecânico monofásico.

Uma observação que se pode fazer com relação aos ensaios é que quando o medidor está submetido ao campo magnético do conjunto de ímãs, o disco de alumínio ficou vibrando e gerou um ruído. Isso ocorreu em várias posições que o ímã foi colocado. Isso pode ser usado como uma indicação que algo não está normal com o medidor, já que o disco de alumínio não oscila durante o funcionamento normal do medidor.

Outro fato foi com relação ao erro sem o ímã, após o ensaio com o ímã. E erro ficou positivo. Isso é um indicativo que o ímã frenador utilizado internamente no medidor de energia foi danificado, como descrito em [42]. Dessa forma não foi possível dar prosseguimento no ensaio do mostrador.

## APÊNDICE B - Ensaio com carga não linear

O ensaio com componente CC, foi realizado com a finalidade de se avaliar se haveria alguma mudança significativa no comportamento do medidor quando submetido ao campo magnético do ímã com uma carga não linear.

O ensaio foi montado utilizando um conjunto de três diodos e três resistores conectados com a rede de distribuição do laboratório, na figura B.1 é apresentado o esquema unifilar.

O medidor padrão Radian RD-30 foi utilizado para realizar o ensaio de exatidão do medidor e para medir os valores de tensão e corrente.



Figura B.1: Unifilar do Ensaio com Carga Não Linear.

Nas tabelas B.1 e B.2 são apresentados os resultados dos resultados dos ensaios realizados em dois medidores de energia. Observou-se que não houve mudança significativa nos resultados dos erros, quando o medidor está sobre a influência do campo magnético do ímã e com carga não linear.

O ensaio foi realizado novamente, com a mudança da polaridade do diodo, conforme figura B.2.

A mudança de polaridade do diodo não alterou de forma significativa os resultados. Nas tabelas B.3 e B.4 estão os resultados dos ensaios.

	Medidor 01			
Sem	ímã - sem di	od	0	
V1 = 129,38	I1 = 14,70		Erro (%)	
V2 = 125,85	I2 = 15,33		0.01	
V3 = 128,10	I3 = 15,03		-0,01	
Sem	ímã - com di	od	0	
V1 = 131,91	I1 = 8,10		Erro (%)	
V2 = 128,46	I2 = 8,36		0.10	
V3 = 129,43	I3 = 8,11		-0,19	
Com	ímã - com di	od	.0	
V1 = 131,92	I1 = 8,05		Erro (%)	
V2 = 128,34	I2 = 8,33		08.45	
V3 = 130,08	I3 = 8,12		-90,40	
Com ímã - sem diodo				
V1 = 130,82	I1 = 15,08		Erro (%)	
V2 = 127,18	I2 = 15,45		08.40	
V3 = 129,30	I3 = 15,17		-90,49	

Tabela B.1: Ensaio do Medidor 1 com Carga Não Linear.

Tabela B.2: Ensaio do Medidor 2 com Carga Não Linear.

Medidor 02				
Sem ímã - sem diodo				
I1 = 15,00		Erro (%)		
I2 = 15,50		-0,10		
I3 = 15,17				
Sem ímã - com diodo				
I1 = 7,99		Erro (%)		
I2 = 8,24		-0,18		
I3 = 8,19				
Com ímã - com diodo				
I1 = 8,03		Erro (%)		
I2 = 8,33		-64,19		
I3 = 8,15				
Com ímã - sem diodo				
I1 = 15,11		Erro (%)		
I2 = 15,40		64.27		
I3 = 15,29		-04,37		
	$\begin{array}{l} \text{Medidor 02} \\ \text{imã - sem di} \\ \hline \text{I1} = 15,00 \\ \hline \text{I2} = 15,50 \\ \hline \text{I3} = 15,17 \\ \text{imã - com di} \\ \hline \text{I1} = 7,99 \\ \hline \text{I2} = 8,24 \\ \hline \text{I3} = 8,19 \\ \hline \text{imã - com di} \\ \hline \text{I1} = 8,03 \\ \hline \text{I2} = 8,33 \\ \hline \text{I2} = 8,33 \\ \hline \text{I3} = 8,15 \\ \hline \text{imã - sem di} \\ \hline \text{I1} = 15,11 \\ \hline \text{I2} = 15,40 \\ \hline \text{I3} = 15,29 \end{array}$	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		



Figura B.2: Unifilar do Ensaio com Carga Não Linear com o Diodo Invertido.

Medidor 01				
Sem ímã - sem diodo				
V1 = 129,26	I1 = 14,70	Erro (%)		
V2 = 126,85	I2 = 15,20	0.01		
V3 = 128,88	I3 = 15,07	-0,01		
Sem ímã - com diodo				
V1 = 130,55	I1 = 7,89	Erro (%)		
V2 = 129,97	I2 = 8,24	0.92		
V3 = 130,22	I3 = 8,10	-0,25		
Com ímã - com diodo				
V1 = 130,37	I1 = 7,90	Erro (%)		
V2 = 128,77	I2 = 8,20	07.06		
V3 = 130,07	I3 = 8,11	-97,90		
Com ímã - sem diodo				
V1 = 129,05	I1 = 14,82	Erro (%)		
V2 = 126,70	I2 = 15,22	07.07		

Tabela B.3: Ensaio do Medidor 1 com Carga Não Linear, Diodo Invertido.

Medidor 01				
Sem ímã - sem diodo				
V1 = 128,08	I1 = 14,78	Erro (%)		
V2 = 126,22	I2 = 15,34	0.14		
V3 = 128,09	I3 = 15,07	-0,14		
Sem ímã - com diodo				
V1 = 129,64	I1 = 7,85	Erro (%)		
V2 = 127,48	I2 = 8,17	0.26		
V3 = 129,08	I3 = 8,04	-0,20		
Com ímã - com diodo				
V1 = 130,66	I1 = 7,91	Erro $(\%)$		
V2 = 128,82	I2 = 8,24	64.00		
V3 = 130,20	I3 = 8,11	-04,09		
Com ímã - sem diodo				
V1 = 129,65	I1 = 14,88	Erro (%)		
V2 = 127,83	I2 = 15,55	64.01		
V3 = 129,37	I3 = 15,22	-04,01		

Tabela B.4: Ensaio do Medidor 2 com Carga Não Linear, Diodo Invertido.