



INSTITUTO FEDERAL
CEARÁ
Campus Fortaleza



Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Telecomunicações
PPGET - IFCE

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ

CAMPUS FORTALEZA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES – PPGET

Lucas Pinheiro de Moura

Protótipo de Medidor de Corrente Elétrica Utilizando Sensoriamento
Óptico para Análise Remota em Redes de Distribuição Elétrica

Fortaleza

2017

LUCAS PINHEIRO DE MOURA

**Protótipo de Medidor de Corrente Elétrica Utilizando Sensoriamento
Óptico para Análise Remota em Redes de Distribuição Elétrica**

Dissertação apresentada à Coordenação
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Telecomunicações (PPGET/IFCE) como requisito
final para a obtenção do grau de mestre em
Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas
Guimarães

FORTALEZA – CE

2017

Catálogo na fonte: Biblioteca Waldyr Diogo de Siqueira

M887p Moura, Lucas Pinheiro de.
Protótipo de medidor de corrente elétrica utilizando
sensoriamento óptico para análise remota em redes de distribuição
elétrica / Lucas Pinheiro de Moura. - Fortaleza: IFCE, 2017.

59 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Telecomunicações – PPGET do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

1. TELECOMUNICAÇÕES - DISSERTAÇÃO. 2. SENSOR
ÓPTICO 3. CORRENTE ELÉTRICA. 4. POLARIMETRICA I.
Título.

CDD 621.382



Protótipo de Medidor de Corrente Elétrica Utilizando Sensoriamento Óptico para Análise Remota em Redes de Distribuição Elétrica

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de mestre em Engenharia de telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Banca Examinadora:

Glendo de Freitas Guimarães
Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães – IFCE

Francisco José Alves de Aquino
Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino – IFCE

Alisson de Conceição
Prof. Dr. Alisson Ferreira da Conceição – IFCE

Daniel Xavier Gouveia
Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia – FCE

Cícero Saraiva Sobrinho
Prof. Dr. Cícero Saraiva Sobrinho - UNILAB

Fortaleza, 26 de maio de 2017

A minha esposa Natássia Cruz Borges de Moura, pelo amor, dedicação e apoio.

Ao meu filho João Luiz.

Aos meus pais.

Dedico.

Agradecimentos

Em primeiro lugar à Deus que me criou e me mantém.

A minha família e em especial à minha esposa, Natássia Cruz Borges de Moura, e aos meus pais, João Batista de Moura e Sônia Régia Pinheiro de Moura pelo apoio e encorajamento.

Ao meu amigo Glendo de Freitas Guimarães, que além de amigo é orientador.

Aos amigos de trabalho do Laboratório Fotônica, em especial: Rogério, Paulo Victor, Guilherme e João Isaac, além do egrégio Prof. Dr. Alisson da Conceição Ferreira, sem os quais esse trabalho não seria possível.

Aos professores da banca julgadora.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações – PPGET/IFCE e aos professores do Departamento de Telemática do IFCE.

A 3v3 Tecnologia, minha primeira experiência profissional além de ter parte nesse trabalho.

A todos os funcionários do IFCE.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, minha segunda casa.

Aos órgãos CAPES, CNPq e FUNCAP pelos e pelo apoio financeiro

*“Não tenhas espírito provinciano. –
Dilata o teu coração, até que seja
universal, “católico”.*

*Não voes como ave de capoeira, quando
podes subir como as águias.”*

- São Josemaría Escrivá

Resumo

O monitoramento das linhas de transmissão / distribuição é tarefa importante a ser realizada por concessionárias de energia elétrica, pois a partir da obtenção dos valores de corrente, tensão e consequentemente potência, é possível fazer o redimensionamento da rede, balanceamento de cargas e prevenção de furtos. A partir dos dados obtidos, programas de manutenção periódicos podem ser feitos para evitar falhas que ocasionam prejuízos financeiros e sociais. A corrente elétrica é uma das principais grandezas a ser monitorada em sistemas de transmissão / distribuição. Sempre houve uma grande dificuldade de realizar essas medidas, pois, devido às altas tensões, não é possível utilizar aparelhos comerciais comuns para medição direta. Dessa forma, é necessário que a tensão seja transformada para níveis menores e medida, sendo então possível determinar a corrente e/ou a tensão. A partir dessa motivação, foi desenvolvido um medidor totalmente óptico baseado em efeito Faraday, bem como desenvolvida uma análise polarimétrica do sensor. O sensor de corrente elétrica foi desenvolvido para aplicação em linhas de distribuição / transmissão, ficando fixo à linha e enviando os valores de corrente medida remotamente. Também foi desenvolvido um circuito em laboratório para gerar uma corrente elétrica compatível com de uma linha de distribuição / transmissão de energia elétrica. O transdutor desenvolvido foi testado em ensaios elétricos realizados em uma empresa de fabricação de medidores de energia e instalado em uma linha de distribuição da empresa CELPA.

Palavras-chave: Sensor óptico, corrente elétrica, Efeito Faraday, Lei de Malus, polarimetria, polarização, campo elétrico, GPRS.

Abstract

The monitoring of the transmission / distribution lines is an important task to be carried out by electric power concessionaires, since from values of current, voltage and consequently power, it is possible to do network resizing, load balancing and theft prevention. From the data obtained, periodic maintenance programs can be made to avoid failures that causes financial and social losses. Electrical current is one of the main parameters to be monitored in transmission / distribution systems. At present, there is great difficulty in carrying out these measurements because due to the high voltages it is not possible to use ordinary commercial devices for direct measurement. Thus, it is necessary to transform the voltage to smaller levels, whereby it is possible to determine the current and / or voltage. Based on this motivation, a fully optical Faraday effect meter was developed, as well as a polarimetric sensor analysis. The electric current sensor was developed for application in distribution / transmission lines, being fixed to the line and sent the measured current values remotely. A laboratory circuit was also developed for simulation of a transmission / distribution network. The developed transducer was tested in electrical tests carried out in a company of manufacture of meters of energy and installed in a line of distribution of the company CELPA.

KEYWORDS: Optical sensors, electrical current, Faraday Effect, Malus' Law, polarimetric analysis, polarization, electrical field, GPRS.

Lista de Símbolos

E	Amplitude do campo elétrico
H	Amplitude do campo magnético
μ	Permeabilidade magnética
ε	Permissividade elétrica
$\vec{k}$	Direção de propagação
E	Campo Elétrico
H	Campo Magnético
j	$\sqrt{-1}$
β	Número de onda
ω	Frequência angular
ϕ	Fase inicial
θ	Ângulo de rotação de Faraday
I	Intensidade luminosa
I_0	Intensidade luminosa incidente
I_t	Intensidade luminosa transmitida
ϑ	Ângulo entre os polarizadores
$i(t)$	Corrente elétrica oscilante no tempo
i_{rms}	Raiz do valor médio quadrático da corrente elétrica

Lista de Abreviações

TGG – Terbium Gallium Garnet

TAG – Terbium Aluminum Garnet

YIG – Yttrium Iron Garnet

NR10 – NORMA REGULAMENTADORA 10 do Ministério Do Trabalho e Emprego

FFT – Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*)

TL – Linha de Transmissão (*Transmission Line*)

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

LED – Diodo Emissor de Luz (*Light-Emitting Diode*)

TC – Transformador de Corrente

SNR – Relação Sinal-Ruído (*Signal-Noise Ratio*)

POM – Polioximetileno

CNC – Comando Numérico Computadorizado

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

PCI – Placa de Circuito Impresso

A/D – Analógico/Digital

DC – Corrente Contínua (*Direct Current*)

Lista de Figuras

Figura 2-1 Distribuição de campos elétrico e magnético em um trem de ondas planas eletromagnéticas em determinado instante de tempo. <i>Fonte:</i> (KEISER, 2014).....	21
Figura 2-2 Representação dos estados de polarização. (a) Linear, (b) Circular e (c) Elíptica.	22
Figura 2-3 Polarização Linear. (a) Na direção de y, (b) na direção de x e na direção de θ	23
Figura 2-4 Polarização Circular à direita (a) e à esquerda (b).....	24
Figura 2-5 Polarização elíptica (a) à direita e (b) à esquerda	26
Figura 2-6 Variação da constante de Verdet em função do comprimento de onda. <i>Fonte:</i> (P. BARNES e B. PETWAY, 1992).....	28
Figura 2-7 Configuração experimental.....	29
Figura 3-1. Aparato experimental do transdutor óptico	32
Figura 3-2 Distribuição de intensidade espectral. (a) LED 465 nm, (b) LED 525 nm e (c) LED 631 nm. <i>Fonte:</i> https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2814&pn=LED631E#4475	33
Figura 3-3 Curva de responsividade (em A/W) do fotodiodo SM05PD1A. <i>Fonte:</i> https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SM05PD1A	33
Figura 3-4 Representação do aparato para geração de uma corrente de alta intensidade.	34
Figura 3-5 Configuração experimental montado para análise da rotação de Faraday.....	35
Figura 3-6 Equipamento gerador de corrente.	36
Figura 4-1 Simulação da variação, em graus, do ângulo de rotação de Faraday em função da distância do fio ao cristal.....	37
Figura 4-2 (a) Resposta em graus para 0, 100, 200, 300, 400 e 500 A. (b) Zoom na resposta do sensor para 500 A.	38
Figura 4-3 Resposta em frequência da rotação do plano de polarização do feixe óptico normalizada.	39
Figura 4-4 Resposta do sensor em função do comprimento de onda. (a) a 90° e (b) a 45°	41
Figura 4-5 Resposta do sensor em função da distância ao fio.....	41
Figura 4-6 Ensaio elétrico realizado com gerador de corrente.	42
Figura 4-7 Leitura de corrente de 0 a 500 A com zoom na faixa de 150 a 175 A.....	43
Figura 4-8 Curva de calibração do sensor faixa de operação de 0 a 10 A.....	43
Figura 4-9 Curva de calibração do sensor faixa de operação de 10 a 350 A.....	44
Figura 4-10 Visão Geral do Protótipo com os componentes em detalhes.....	45
Figura 4-11 Entrada analógica.....	47

Figura 4-12 Esquemático do circuito eletrônico.....	48
Figura 4-13 Diagrama de blocos do sistema de medição remota.	49
Figura 4-14 Instalação na rede desligada.	50
Figura 4-15 Sensor instalado na linha de 13,8 kV.....	50
Figura 4-16 Tela de login da página <i>WEB</i>	52
Figura 4-17 Parâmetros Ópticos.	53
Figura 4-18 Medidas enviadas pelo sensor.....	53
Figura 4-19 Gráfico dos valores de corrente ao longo do dia.	54

Sumário

Agradecimentos.....	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Símbolos	x
Lista de Abreviações	xi
Lista de Figuras	xii
Sumário	xiv
CAPÍTULO 1	16
1. Introdução	16
1.1. Justificativa.....	17
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivos Gerais.....	18
1.2.2. Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO 2	19
2. Fundamentação Teórica.....	19
2.1. Revisão Bibliográfica.....	19
2.2. Polarização de Ondas Eletromagnéticas	20
2.3. Polarização	21
2.4. Representação Matemática do Estado de Polarização	22
2.4.1. Polarização Linear.....	22
2.4.2. Polarização Circular	23
2.4.3. Polarização Elíptica.....	25
2.5. Efeito Faraday	26
CAPÍTULO 3	32
3. Materiais e Métodos	32
3.1. Materiais.....	32

3.1.1. Materiais utilizados no protótipo do Transdutor.....	32
3.1.2. Arranjo Experimental em Laboratório	34
3.2. Métodos.....	34
3.2.1. Medidas de Análise polarimétrica.....	34
3.2.2. Medidas em laboratório	35
3.2.3. Calibração do sensor	36
3.2.4. Ensaio de exatidão	36
CAPÍTULO 4	37
4. Resultados.....	37
4.1. Ensaaios em Laboratório.....	37
4.1.1. Análise Polarimétrica	37
4.1.2. Análise por Comprimento de Onda e Rotação entre Polarizadores.....	39
4.1.3. Ensaio de exatidão	42
4.1.4. Calibração do Sensor	42
4.2. Protótipo	44
4.2.1. Projeto Mecânico e Fabricação	44
4.2.2. Instrumentação Eletrônica.....	46
4.2.3. Instalação	49
4.2.4. Pagina Web e Acesso Remoto.....	51
CAPÍTULO 5	55
5. Conclusões.....	55
5.1. Conclusão	55
5.2. Perspectiva de trabalhos futuros.....	55
Bibliografia.....	57
ANEXO A – Publicações Científicas.....	59
A.1 Publicações Científicas relacionadas à dissertação:	59
A.2. Publicações não relacionadas à Dissertação:	59

CAPÍTULO 1

1. Introdução

Devido ao forte crescimento do consumo de energia elétrica nas últimas décadas em consequência do aumento na quantidade de equipamentos eletro-eletrônicos e eletrodomésticos, surgiu a necessidade da ampliação do fornecimento de energia por parte das companhias de energia elétrica além da ampliação da rede a fim de abranger mais regiões. Com isso também aumentou o interesse dessas companhias na realização da medição do consumo de energia nas linhas de distribuição e transmissão, com vista ao desenvolvimento de redes inteligentes. Nas regiões do sistema elétrico de potência (SEP), onde a tensão já foi transformada de 69 kV para 13,8 kV, as concessionárias de eletricidade possuem maior interesse de realizar as medidas de corrente e tensão, consequentemente potência, pois existe maior ramificação, havendo maior possibilidade de falhas, desperdícios e fraudes.

Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas com o objetivo de mensurar as diversas grandezas constituintes de redes de energia elétrica, como indução magnética, piezoeletricidade, óptica, entre outras. Sensores ópticos possuem diversas vantagens em relação aos sensores elétricos convencionais, pois são formados de componentes passivos não condutores (dielétricos), possuem baixo peso, tamanho pequeno, imunidade a interferências eletromagnéticas, funcionam em temperaturas elevadas, alta sensibilidade, além da possibilidade serem multiplexados (UDD e SPILLMAN JR., 2011). Devido a tais características, os sensores ópticos são de bastante interesse do setor elétrico, principalmente nas áreas de distribuição e transmissão, pois para valores altos de tensão (até 750 kV) os sensores convencionais não podem ser aplicados.

Dentre os principais métodos utilizados para o desenvolvimento de sensores ópticos de corrente, destaca-se o Efeito Faraday, descoberto por Michael Faraday em 1845 (FOWLES, 2012). Tal efeito modula a polarização de uma luz linearmente polarizada de acordo com o campo magnético ao qual o dielétrico está submetido. O Efeito Faraday é observado em praticamente todos os dielétricos encontrados, porém com maior ou menor intensidade dependendo da constante de proporcionalidade, também chamada de constante de Verdet.

O presente trabalho descreve o estudo e o desenvolvimento de um protótipo de sensor de corrente totalmente óptico utilizando um cristal magneto-óptico TGG (*Terbium Gallium Garnet* - TGG) para aplicação em linhas de distribuição e transmissão de energia, bem como o desenvolvimento de uma plataforma para o envio das medidas realizadas remotamente.

Este trabalho faz parte de um projeto de P&D – ANEEL (Pesquisa e Desenvolvimento – Agência Nacional de Energia Elétrica) junto à empresa CELPA (Centrais Elétricas do Pará) como parte do desenvolvimento de um projeto de *BigData*.

Esta dissertação é composta de 6 capítulos, que apresentam as etapas de realização e conclusão de pesquisa referente à produção do equipamento estudado nesse trabalho.

1.1. Justificativa

O monitoramento da corrente elétrica em linhas de distribuição e/ou transmissão é de suma importância para empresas do setor elétrico. Através das análises da corrente mensurada ao longo de um período é possível determinar o consumo médio, a carga de uma região, furtos, falhas no fornecimento, sobrecarga, etc. O balanceamento de carga entre as fases de um circuito, que só é possível através da aferição da corrente elétrica, também é uma prática comum para atenuar o desgaste nos equipamentos e adequar as condições de operação.

Monitoramento remoto e on-line das grandezas elétricas é importante para o acompanhamento e gerenciamento em redes elétricas, pois torna possível a verificação de furtos, de sobrecarga, de curto-circuito, além da distinção entre cabos energizados e desenergizados durante os procedimentos de instalação de novos circuitos ou de manutenção em linhas já existentes. Alguns medidores presentes no mercado, apesar de medirem altas correntes, não são aplicáveis a medição de corrente em linhas de alta tensão. Dessa forma, os sensores ópticos, considerando suas propriedades, são apropriados para aplicações em alta tensão.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo realizar os estudos relativos à aplicação de Efeito Faraday em medição de corrente elétrica em linhas de até 69 kV, desenvolver um transdutor totalmente óptico para realizar as medidas, desenvolver a instrumentação eletrônica para digitalização do sinal recebido do transdutor além do desenvolvimento de duas abordagens para medição da corrente, uma fixa, enviando remotamente os valores medidos a um servidor *web* e outra móvel para uso individual dos técnicos que operam no sistema elétrico.

1.2.2. Objetivos Específicos

- 1) Aplicar Efeito Faraday como metodologia para determinar corrente elétrica em linhas de distribuição.
- 2) Desenvolver sensor óptico para medição da corrente elétrica utilizando Efeito Faraday.
- 3) Análise polarimétrica da luz alterada pelo estímulo do campo magnético ao cristal.
- 4) Análise do comportamento do sensor em funcionamento com diversos comprimentos de onda.
- 5) Desenvolvimento de aplicação para medir corrente remotamente e envio para servidor *web*.

CAPÍTULO 2

2. Fundamentação Teórica

2.1. Revisão Bibliográfica

Monitorar a corrente e a voltagem em sistemas elétricos de potência, tais como subestações, linhas de transmissão e de distribuição é uma tarefa importante por razões de tarifação, controle de consumo e proteção da rede elétrica (REILLY *et al.*, 2006), (SILVA *et al.*, 2012) e (WERNECK e ABRANTES, 2004). Devido aos altos valores de corrente e tensão (até 2 kA e 750 kV), é necessário que esse monitoramento seja realizado de forma segura. Há basicamente duas formas de se medir a corrente elétrica em linhas de média ou alta tensão opticamente (*Optical Current Sensors - OCS*): através de Efeito Faraday ou de força magnética (Silva *et al.*, 2012).

Para os sensores baseados em Efeito Faraday, a técnica é medir a variação de ângulo de polarização causada pelo campo magnético. Uma grande variedade de sensores ópticos de corrente utiliza fibra óptica como elemento sensor (*Fiber Optical Current Sensors - FOCS*) (DE NAZARÉ e WERNECK, 2015). Entretanto, esses dispositivos requerem uma fibra longa devido à pequena constante de Verdet da sílica (WERNECK e ABRANTES, 2004). Outra forma de realizar medidas de corrente elétrica, através de Efeito Faraday, consiste em utilizar vidros com alto índice de refração ou estruturas cristalinas. Os vidros densos e cristais possuem uma maior constante de Verdet em relação às fibras ópticas, permitindo equipamentos mais compactos. Outra desvantagem de sensores de corrente de Efeito Faraday em fibra óptica em relação aos demais OCS's é a necessidade de desligar a linha de transmissão para sua instalação, pois o sensor precisa ser instalado ao redor da linha (DE NAZARÉ e WERNECK, 2015).

Os sensores ópticos de corrente baseados em força magnética medem a força aplicada pelo campo magnético ao elemento sensor. Pode-se citar, como exemplo, sensores de corrente baseados em grades de Bragg, onde o campo magnético aplica de maneira direta ou indireta uma tração mecânica à grade, variando o período da grade (DE NAZARÉ e WERNECK, 2015). A tração provocada pela força magnética, gerada pelo campo magnético induzido pela corrente alternada da linha de transmissão, causa uma variação no período da grade, fazendo com que o comprimento de onda refletido seja alterado dependendo da força. Nesses casos é necessário

que a demodulação seja feita em termos de comprimento de onda. Em (DE NAZARÉ e WERNECK, 2015), os autores obtiveram uma variação de 1,6 nm para uma faixa de 0 a 500 A, significando uma taxa de 3.2 pm/A.

Diversos outros sensores ópticos de corrente foram estudados por (SILVA *et al.*, 2012), evidenciando que o sensoriamento óptico tem se mostrado eficiente na supervisão de grandezas elétricas. Os principais motivos para esta crescente demanda, são: imunidade eletromagnética, maior acuracidade, alta classe de isolamento, robustez e durabilidade, características intrínsecas dos componentes ópticos.

Além de sensores ópticos, várias técnicas de medição de corrente já são amplamente utilizadas. Dentre elas, é possível citar os sensores transformadores de corrente (*Current Transformer Sensors – CTS*) e os alicates amperímetros (*clamp meters*). Como desvantagens, sensores CTS demandam o desligamento da linha para sua instalação, enquanto os alicates amperímetros não devem ser utilizados em ambientes de alta tensão, devido a baixa isolamento elétrica (GALLIANA e CAPRA, 2012). Além disso, os efeitos de saturação que ocorrem em sensores elétricos convencionais são evitados em OCS, permitindo medidas em valores maiores de tensão.

2.2. Polarização de Ondas Eletromagnéticas

As características de propagação de ondas eletromagnéticas, dentre elas a polarização da luz, podem ser compreendidas através da teoria formulada por Maxwell. A luz se comporta como uma onda eletromagnética, ou seja, uma oscilação em fase de campos elétricos e magnéticos propagantes. As características da luz (na ausência de cargas e de fontes de corrente livres) podem ser descritas através das equações de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

onde, $\mathbf{E}$ é o campo elétrico, $\mathbf{H}$ é o campo magnético, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, μ permeabilidade magnética e ϵ é a permissividade elétrica (KEISER, 2014).

Na Figura 2-1, pode-se observar as distribuições dos campos elétrico e magnético de uma onda plana em um dado instante de tempo. As ondas sempre se propagam na direção indicada pelo vetor $\vec{k}$. A partir das equações de Maxwell, temos que $\vec{E}$ e $\vec{H}$ são perpendiculares entre si e à direção de propagação ($\vec{k}$) e formam um conjunto de vetores ortogonais (KEISER, 2014).

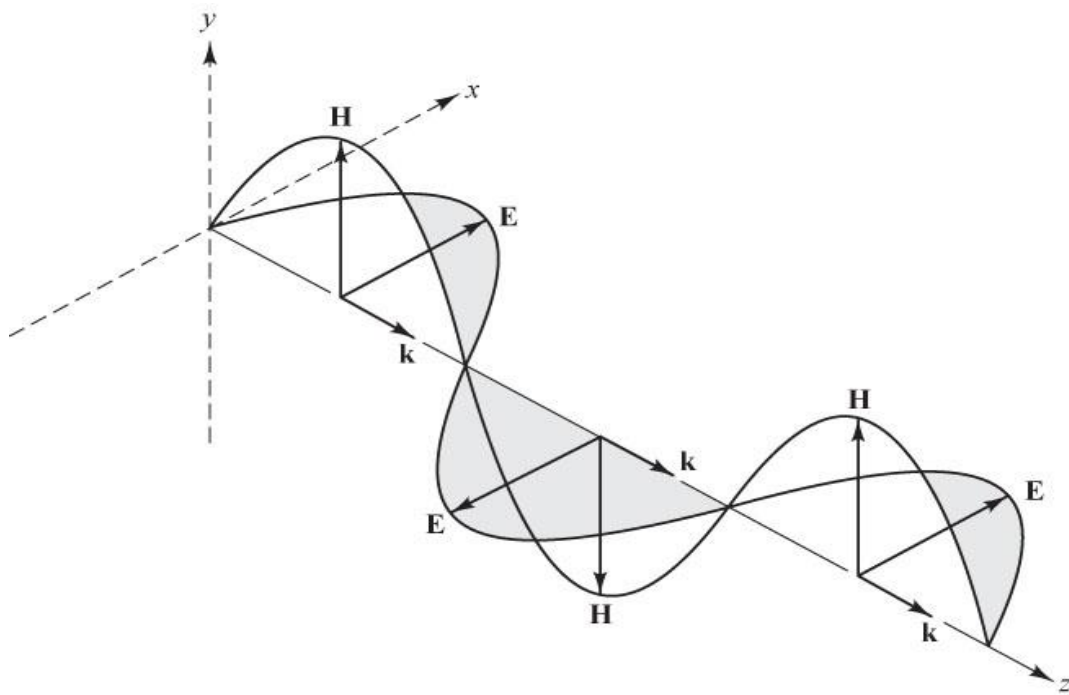


Figura 2-1 Distribuição de campos elétrico e magnético em um trem de ondas planas eletromagnéticas em determinado instante de tempo. *Fonte:* (KEISER, 2014).

2.3. Polarização

A polarização de uma onda eletromagnética é definida como a propriedade de uma onda eletromagnética que descreve a direção e a magnitude relativa ao vetor campo elétrico variante no tempo, sendo determinada pela figura geométrica traçada pela ponta da seta do vetor campo elétrico, de acordo com o *IEEE Standard Definitions for Antennas*. Especificamente, a polarização pode ser classificada em três categorias: linear, circular e elíptica. O estado de polarização de uma onda é sempre tomado do ponto de vista de um observador situado sobre eixo de propagação ($\vec{z}$) enquanto a onda se afasta. A onda está polarizada linearmente (ver Figura 2-2 (a)) se o vetor campo elétrico em função do tempo tem sempre a mesma direção, normal à direção de propagação. Quando a figura traçada pela ponta da seta do vetor campo elétrico é uma circunferência, dizemos que a onda é circularmente polarizada (ver Figura 2-2

(b)). Nos casos onde a figura traçada pela ponta da seta do vetor campo elétrico é uma elipse chamamos a onda de elipticamente polarizada (ver Figura 2-2 (c)), que é o caso geral de ondas polarizadas. (BALANIS, 2012).

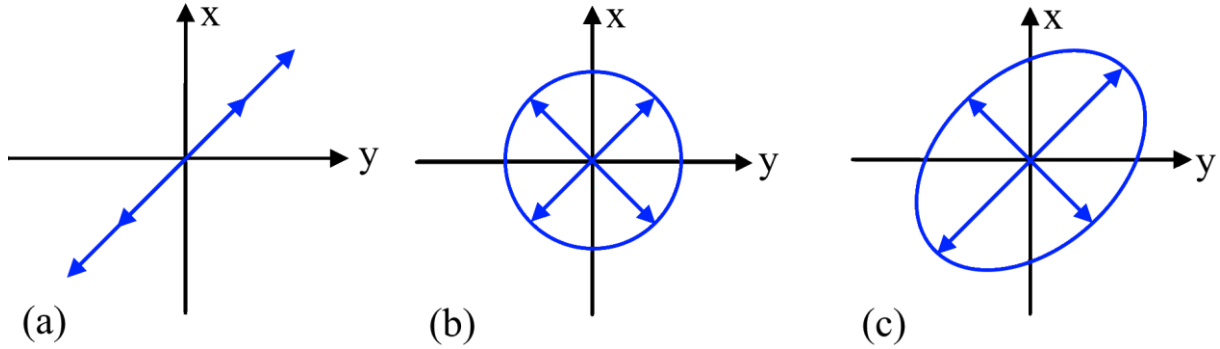


Figura 2-2 Representação dos estados de polarização. (a) Linear, (b) Circular e (c) Elíptica.

2.4. Representação Matemática do Estado de Polarização

2.4.1. Polarização Linear

Considerando uma onda plana harmônica, com componentes elétricas em x e y , se propagando na direção positiva de z , mostrada na Figura 2-1. O campo elétrico será dado por:

$$\mathbf{E} = \hat{a}_x \mathcal{E}_x + \hat{a}_y \mathcal{E}_y$$

$$\mathbf{E} = \Re[\hat{a}_x E_x^+ e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_y^+ e^{j(\omega t - \beta z)}]$$

$$\mathbf{E} = \hat{a}_x E_{x_0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) + \hat{a}_y E_{y_0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_y) \quad (5)$$

onde E_x^+ e E_y^+ são complexos e $E_{x_0}^+$ e $E_{y_0}^+$ são reais.

Considerando a variação do vetor campo elétrico instantâneo ($\mathbf{E}$) dada pela equação (5), no plano $z = 0$, e fazendo $E_{y_0}^+ = 0$, temos:

$$E_x = E_{x_0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) \quad (6)$$

$$E_y = 0 \quad (7)$$

logo,

$$\mathbf{E} = E_{x_0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) \hat{a}_x \quad (8)$$

Assim, a polarização da onda descrita pela equação 6 será uma linha reta e terá sempre a direção ao longo do eixo x , como é mostrado na Figura 2-3. A onda é dita linearmente

polarizada na direção de x (ver Figura 2-3 (b)). Analogamente, quando $E_x = 0$, teremos uma onda polarizada linearmente na direção de y (Figura 2-3 (a)). Nos casos em que temos componentes em x e em y , a onda será polarizada linearmente, porém em uma direção diferente de x e de y (ver Figura 2-3 (c)).

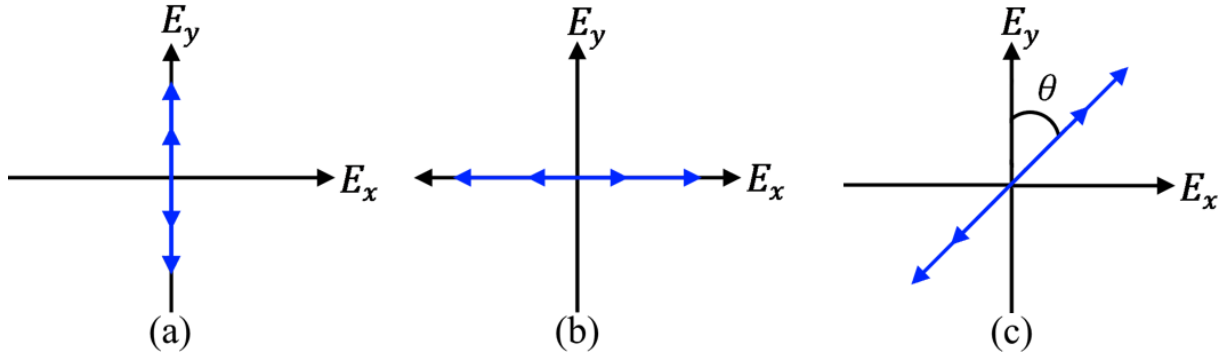


Figura 2-3 Polarização Linear. (a) Na direção de y , (b) na direção de x e na direção de θ .

2.4.2. Polarização Circular

Uma onda é dita como circularmente polarizada se a ponta da seta do vetor campo elétrico descreve uma circunferência no espaço. Em diversos instantes de tempo, a intensidade de campo elétrico tem a mesma amplitude e a orientação no espaço muda continuamente no tempo de tal maneira que descreve uma circunferência (BALANIS, 2012).

Uma onda tem polarização circular à direita quando a ponta da seta do vetor campo elétrico tem o sentido de rotação horário, observado de um ponto ao longo do eixo de propagação ($\vec{k}$).

Examinando o vetor campo elétrico (E), representado na equação (5), em $z = 0$ como função do tempo, nas condições mostradas a seguir:

$$\phi_x = 0 \quad (9)$$

$$\phi_y = -\pi/2 \quad (10)$$

$$E_{x_0}^+ = E_{y_0}^+$$

$$E_{x_0}^+ = E_R \quad (11)$$

temos,

$$E_x = E_R \cos(\omega t) \quad (12)$$

$$E_y = E_R \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$E_y = E_R \sin(\omega t) \quad (13)$$

A figura geométrica formada pela ponta da seta do vetor campo elétrico é dada por:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$E = \sqrt{E_R^2(\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t))}$$

$$E = E_R \quad (14)$$

e é direcionado ao longo de uma linha fazendo um ângulo ψ com o eixo x , que é dado por:

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{E_y}{E_x} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{E_R \sin(\omega t)}{E_R \cos(\omega t)} \right] = \tan^{-1}[\tan(\omega t)] = \omega t \quad (15)$$

Se traçarmos o gráfico da figura descrita pela ponta da seta do vetor campo elétrico em vários instantes de tempo no plano $z = 0$, pode-se observar que forma uma circunferência com raio E_R e gira no sentido horário com frequência angular ω , como é mostrado na Figura 2-4 (a). Assim, a onda é dita circularmente polarizada à direita.

Dessa forma, o vetor campo elétrico instantâneo pode ser escrito como:

$$E = \Re[\hat{a}_x E_R e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_R e^{j(\omega t - \beta z - \pi/2)}]$$

$$E = E_R \Re\{[\hat{a}_x - j\hat{a}_y] e^{j(\omega t - \beta z)}\} \quad (16)$$

Nota-se que há uma diferença de fase de 90 graus entre as duas componentes ortogonais do vetor campo elétrico.

Na Figura 2-4, pode-se observar a representação dos estados de polarização circulares (a) à direita e (b) à esquerda.

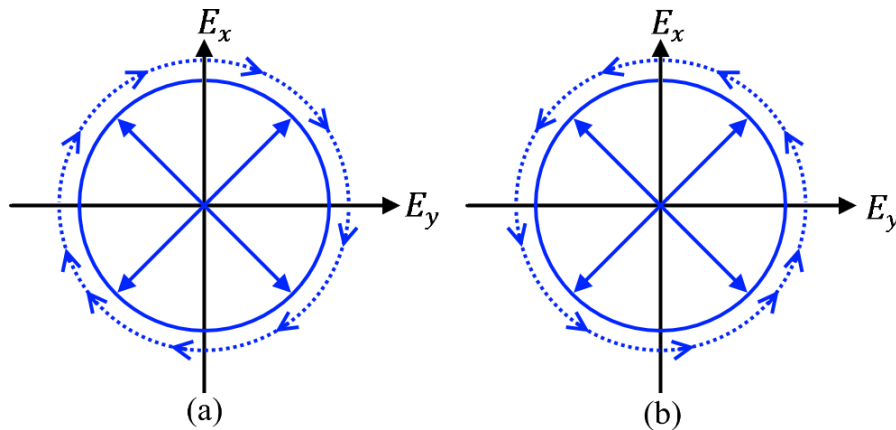


Figura 2-4 Polarização Circular à direita (a) e à esquerda (b).

Da discussão anterior, temos que uma polarização circular à direita pode ser obtida se e somente se as duas componentes ortogonais linearmente polarizadas possuem amplitudes iguais e uma diferença de fase de 90 graus uma em relação à outra. O sentido de rotação (horário, nesse caso) é determinado pela rotação da fase adiantada (E_x nesse caso) em relação à fase atrasada (E_y). É necessário que a rotação do campo elétrico seja observada a partir de um observador localizado em um ponto fixo e a onda esteja se afastando desse observador. De maneira análoga, pode-se chegar às mesmas conclusões para uma onda circularmente polarizada à esquerda.

2.4.3. Polarização Elíptica

Uma onda é dita elipticamente polarizada quando o vetor campo elétrico traça, em função do tempo, uma figura elíptica no espaço. É elipticamente polarizada à direita quando o vetor campo elétrico gira no sentido horário e elipticamente polarizada à esquerda quando o vetor campo elétrico gira no sentido anti-horário (BALANIS, 2012).

Analisando o comportamento descrito instantaneamente pelo vetor campo elétrico (E), dado pela equação (5), no plano $z = 0$ em relação ao tempo, e considerando:

$$\phi_x = \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

$$\phi_y = 0 \quad (18)$$

$$E_{x_0}^+ = (E_R + E_L) \quad (19)$$

$$E_{y_0}^+ = (E_R - E_L) \quad (20)$$

temos,

$$E_x = (E_R + E_L) \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -(E_R + E_L) \sin(\omega t) \quad (21)$$

$$E_y = (E_R - E_L) \cos(\omega t) \quad (22)$$

Dessa forma, a amplitude do vetor campo elétrico é dada por:

$$\begin{aligned} E^2 &= E_x^2 + E_y^2 = (E_R + E_L)^2 \sin^2(\omega t) + (E_R - E_L)^2 \cos^2(\omega t) \\ &= E_R^2 \sin^2 \omega t + E_L^2 \sin^2 \omega t + 2E_R E_L \sin^2 \omega t + E_R^2 \cos^2 \omega t \\ &\quad + E_L^2 \cos^2 \omega t - 2E_R E_L \cos^2 \omega t \\ E_x^2 + E_y^2 &= E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L [\sin^2 \omega t - \cos^2 \omega t] \end{aligned} \quad (23)$$

A partir de (21) e (22), temos que:

$$\sin(\omega t) = -E_x / (E_R + E_L) \quad (24)$$

$$\cos(\omega t) = E_y / (E_R - E_L) \quad (25)$$

substituindo em (23), temos:

$$\left\{ \frac{E_x}{E_R + E_L} \right\}^2 + \left\{ \frac{E_y}{E_R - E_L} \right\}^2 = 1 \quad (26)$$

que é a equação de uma elipse com o eixo maior $|E|_{max} = |E_R + E_L|$ e o eixo menor $|E|_{min} = |E_R - E_L|$. Ao longo do tempo, o vetor campo elétrico gira variando sua magnitude com a sua extremidade formando a figura de uma elipse, como mostrado na Figura 2-5.

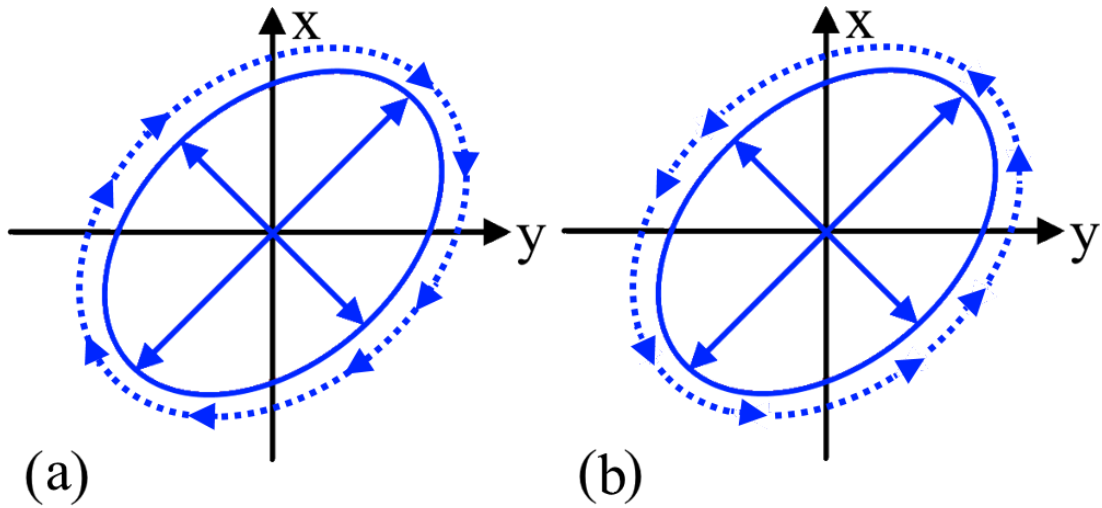


Figura 2-5 Polarização elíptica (a) à direita e (b) à esquerda

2.5. Efeito Faraday

Diversos dispositivos para sensoriamento de corrente elétrica que utilizam tecnologia óptica são direta ou indiretamente baseados no efeito magneto-óptico de Faraday (SATPATHI, MOORE e ENNIS, 2005). Michael Faraday, em 1845, descobriu que a birrefringência circular pode ser induzida em um dielétrico aplicando-se um campo magnético. Tal modulação é o princípio utilizado para medir um campo magnético e, consequentemente, a corrente que gera esse campo. Dessa forma, o efeito Faraday descreve a modificação do estado de polarização de um feixe de luz linearmente polarizado quando este se propaga por um material dielétrico submetido a um campo magnético (KAPLAN, BORODA e SUISSA, 2007).

Se o estado de polarização de uma onda muda, o material é dito como birrefringente e a birrefringência é classificada de acordo com o tipo de onda que não é afetada nesse meio.

Assim, o estado de polarização de uma onda circularmente polarizada permanece inalterado em um meio com birrefringência circular. Esse mesmo material tem uma forte influência em uma onda linearmente polarizada. De maneira geral, a mudança no estado de polarização, depende do comprimento do caminho óptico no material birrefringente, da constante de proporcionalidade e do tipo de estado de polarização de entrada.

Considerando as características descritas, o estado de polarização de um feixe de luz pode ser modulado pelo campo magnético gerado pela corrente em um condutor (SATPATHI, MOORE e ENNIS, 2005). Este efeito ocorre de acordo com as propriedades magneto-ópticas do material (MAJEED, SHAHEEN e ANWAR, 2013) e (ROGERS, 1976).

Para materiais isotrópicos, a rotação do plano de polarização da luz (θ) é proporcional ao comprimento do material de Faraday (L), pelo qual a luz atravessa, e à intensidade do campo magnético (B) na direção de propagação do feixe (FOWLES, 2012):

$$\theta = V \int_0^L \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (27)$$

onde V é a constante de Verdet, que depende do comprimento de onda e da temperatura e é expressa no SI em ($rad/T \cdot m$), $\vec{B}$ o campo magnético resultante na direção do cristal e L o comprimento do cristal (MAJEED, SHAHEEN e ANWAR, 2013), (CHEN *et al.*, 2015).

O Efeito Faraday é uma característica de dielétricos, tendo sua intensidade dependendo da constante de Verdet. A maior influência no valor da constante de Verdet provém do material constitutivo do dielétrico, porém, também depende do comprimento de onda da luz utilizada e da temperatura. Em (MAJEED, SHAHEEN e ANWAR, 2013), os autores fizeram um extenso estudo relativo da influência da temperatura no valor da constante de Verdet, podendo-se concluir que a variação é insignificante para temperaturas na faixa de 250 a 350 K em um cristal TGG.

Diversos materiais possuem constante de Verdet alta, incluindo vidros densos, cristais como YIG (*Yttrium Iron Garnet*), TGG, TAG (*Terbium Aluminum Garnet*), além de filmes finos produzidos com esses materiais e cristais de sílica (fibra óptica e quartzo). Os cristais citados possuem altos valores de constante de Verdet, YIG $63,77 rad/T \cdot m$, o TGG $74,79 rad/T \cdot m$ e o TAG $134 rad/T \cdot m$, todos no comprimento de onda de 632 nm.

Materiais com a estrutura cristalina de granada (em inglês *garnet*), termo derivado do latim que quer dizer “granulado”, quando encontrados na natureza, podem ser representados

pela fórmula geral $M_3Fe_5O_{12}$, onde M representa o íon de metal terra-rara (CALLISTER e RETHWISCH, 2011). Os cristais com estrutura de granada também podem ser sintetizados, caso do TGG (utilizado nesta dissertação), onde o ferro (Fe_5) é substituído por outro metal, no caso, o Gálio. Tais materiais são comumente utilizados em dispositivos ópticos devido às suas propriedades, destacando-se o alto índice de refração e a birrefringência (CALLISTER e RETHWISCH, 2011).

Na Figura 2-6 pode-se observar a variação da constante de Verdet em função do comprimento de onda da fonte luminosa utilizada. Nota-se que há um aumento exponencial da constante ao mesmo tempo que se aumenta a frequência da luz.

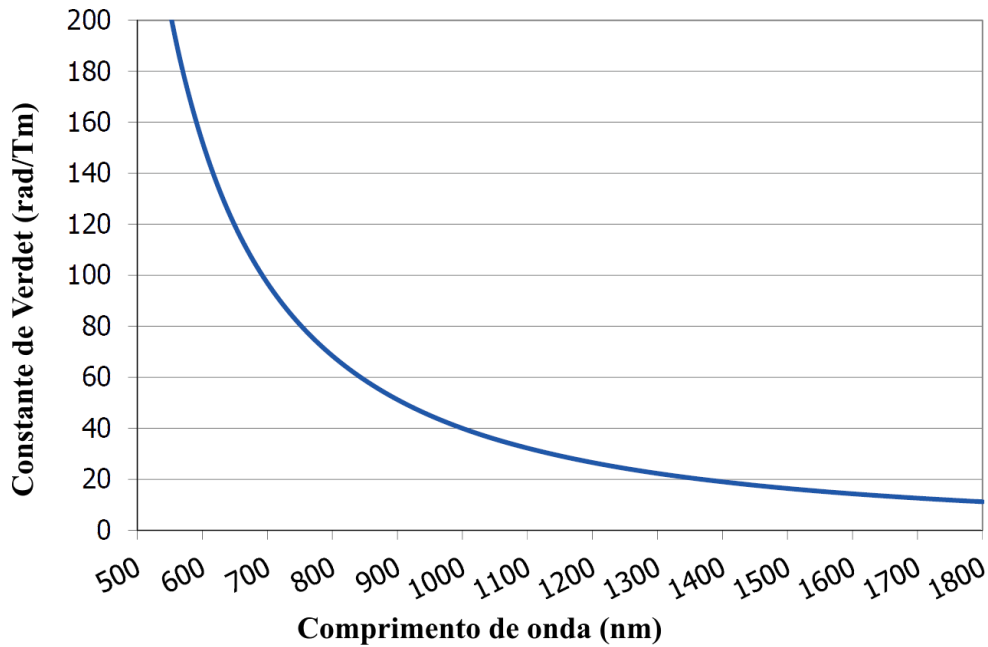


Figura 2-6 Variação da constante de Verdet em função do comprimento de onda. *Fonte:* (BARNES e B. PETWAY, 1992)

A alteração no estado de polarização do feixe de luz pode ser analisada por meio de métodos interferométricos ou polarimétricos. O método polarimétrico é a forma mais direta de se medir o efeito Faraday e consiste em analisar polarização da luz por meio da modulação da intensidade luminosa imposta por polarizadores. A relação entre a intensidade de luz incidente no polarizador e transmitida pelo mesmo é expressa pela Lei de Malus (UDD e SPILLMAN JR., 2011):

$$I_t = I_0 \cos^2(\varphi) \quad (28)$$

onde I_0 e I_t representam, respectivamente, a intensidade da luz incidente e transmitida e φ é o ângulo entre a direção de polarização da luz e do polarizador.

Um dos principais métodos para medição de corrente considera o método polarimétrico descrito pela Lei de Malus e o Efeito Faraday descritos nas equações (27) e (28). Na Figura 2-7 é apresentada a estrutura para análise de corrente e campo magnético utilizando os métodos descritos anteriormente, bem como a representação dos componentes que formam o transdutor descrito nesse trabalho. O primeiro polarizador é responsável por polarizar a luz linearmente, o cristal irá imprimir uma rotação proporcional à corrente passante no fio condutor e o segundo polarizador irá fazer a análise do sinal modulado pelo cristal.

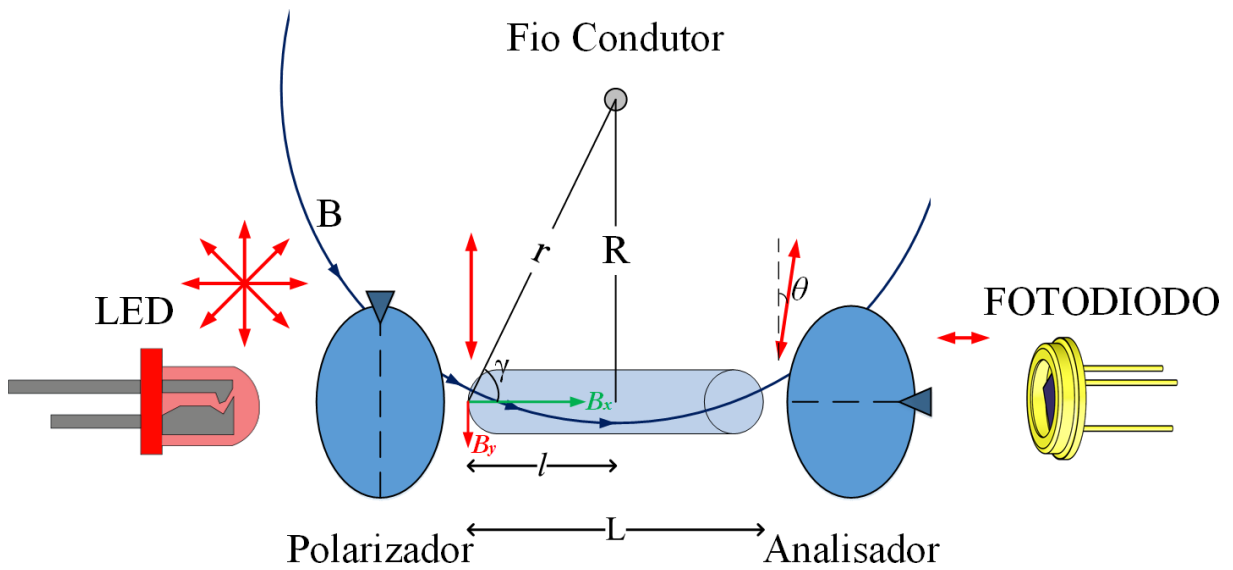


Figura 2-7 Configuração experimental.

Considerando o campo magnético gerado pela corrente passante em um fio condutor, seu valor será dado por:

$$B_x(t) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \quad (29)$$

onde $i(t)$ é a corrente passante no fio, r é a distância do ponto onde o campo é medido ao fio e μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo.

A partir da Figura 2-7 podemos concluir que a distância r será dada por:

$$r = \sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} - l\right)^2} \quad (30)$$

onde R é a distância do centro do cristal ao centro do fio, L o comprimento do cristal e l a distância do ponto onde o campo é medido ao centro do cristal.

O campo magnético resultante na direção x (ao longo do comprimento do cristal) é dado por:

$$B_x = B \sin(\gamma) \quad (31)$$

$$\sin(\gamma) = \frac{R}{r} \quad (32)$$

Substituindo (31) e (32) em (29), temos:

$$\begin{aligned} B_x(t) &= \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \cdot \frac{R}{r} \\ B_x(t) &= \frac{\mu_0 i(t) R}{2\pi r^2} \end{aligned} \quad (33)$$

Substituindo (33) em (27), temos:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= V \cdot \int_0^L \frac{\mu_0 i(t) R}{2\pi r^2} \cdot dl \\ \theta(t) &= \left[-\frac{V\mu_0 i(t)}{2\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\frac{L}{2} - l}{R} \right) \right]_0^L \\ \theta(t) &= \left[-\frac{V\mu_0 i(t)}{2\pi} \cdot \left[\tan^{-1} \left(\frac{-L}{2R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L}{2R} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (34)$$

Para a representação da Figura 2-7, foram analisadas neste trabalho duas situações: na primeira, o ângulo (ϑ) entre as direções de polarização dos dois polarizadores é 90° e na segunda, 45° .

Substituindo φ por $\theta + \vartheta$ em (28), temos:

$$I_t = I_0 \cos^2(\theta + \vartheta) \quad (35)$$

logo,

$$I_{t(\vartheta=45^\circ)} = I_0 \left[1 - \frac{1}{2} (\sin 2\theta) \right] \quad (36)$$

$$I_{t(\vartheta=90^\circ)} = I_0 \sin^2 \theta \quad (37)$$

Substituindo (34) em (36) e (37), temos:

$$I_{t(\vartheta=45^\circ)} = I_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{V\mu_0 I}{\pi} \cdot \left(\tan^{-1} \left(\frac{-L}{2R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L}{2R} \right) \right) \right) \right] \right] \quad (38)$$

$$I_{t_{(\vartheta=90^\circ)}} = I_0 \left[\sin^2 \left[-\frac{V\mu_0 I}{2\pi} \cdot \left(\tan^{-1} \left(\frac{-L}{2R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L}{2R} \right) \right) \right] \right] \quad (39)$$

Dessa forma, através das equações (38) e (39) é possível obter a intensidade luminosa de um sinal óptico ao atravessar um cristal submetido a um campo magnético dependente do tempo.

CAPÍTULO 3

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

3.1.1. Materiais utilizados no protótipo do Transdutor

Na Figura 3-1, é apresentado o aparato experimental do transdutor óptico, que é constituído por: (1) LED 635nm (LED631E – Thorlabs); (2) suporte para LED (SM05LEDM – Thorlabs); (3) polarizadores (PCB-2.5-VIS – Thorlabs); (4) cristal de Efeito Faraday (TGG - $Tb_3Ga_5O_{12}$) e (5) fotodiodo (SM05PD1A – Thorlabs).

A fonte luminosa utilizada é um LED com comprimento de onda de 631 nm e largura de banda de 10 nm , o detector é um fotodiodo na faixa de 350 nm a 1100 nm . Também são utilizados dois polarizadores na faixa de 440 a 650 nm , um para polarizar a luz linearmente e outro como analisador, o cristal de efeito Faraday TGG é o elemento sensor que é sensibilizado pelo campo magnético gerado pelo fio. Para comparação, foi utilizado um alicate amperímetro modelo Fluke 305.

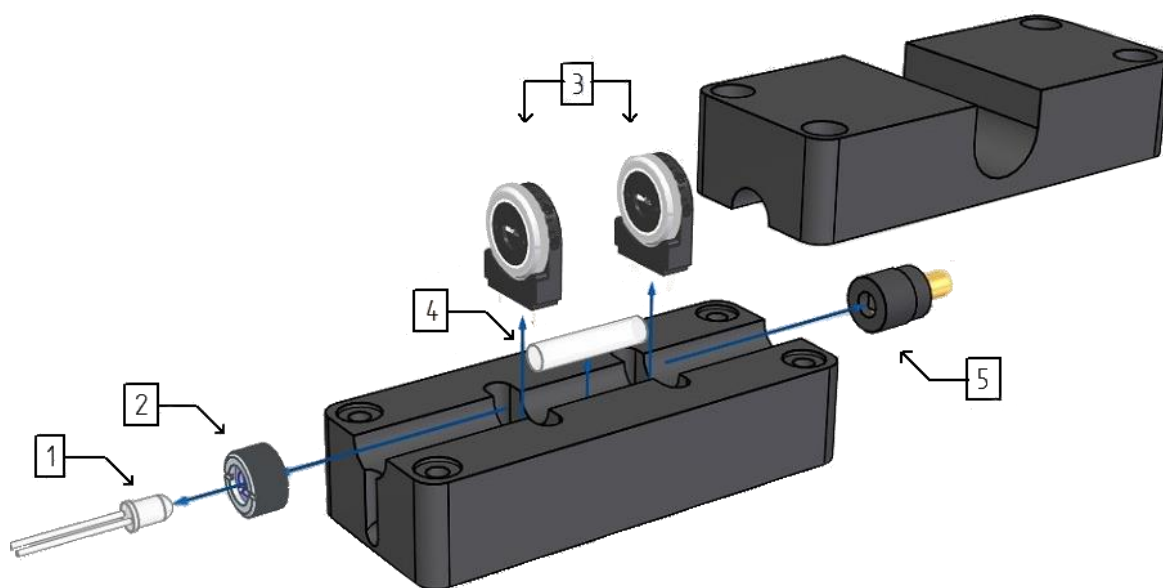


Figura 3-1. Aparato experimental do transdutor óptico

Na Figura 3-2 (a), Figura 3-2 (b) e Figura 3-2 (c) é apresentada a distribuição de intensidade espectral dos LED's utilizados nesse trabalho, 465 nm, 525 nm e 631 nm, respectivamente. Já na Figura 3-3 pode-se observar a responsividade espectral do fotodiodo SM05PD1A em termos de A/W.

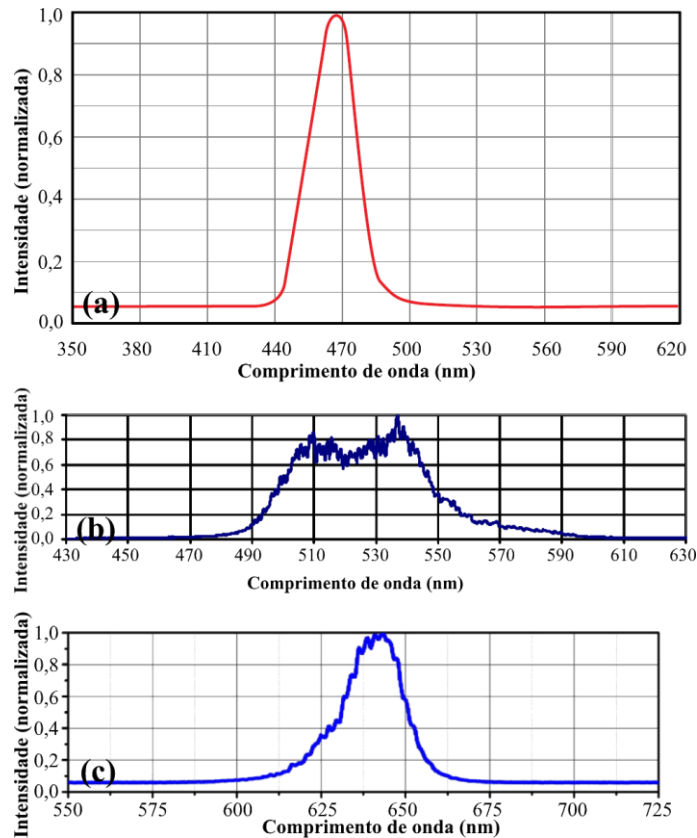


Figura 3-2 Distribuição de intensidade espectral. (a) LED 465 nm, (b) LED 525 nm e (c) LED 631 nm.

Fonte: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2814&pn=LED631E#4475

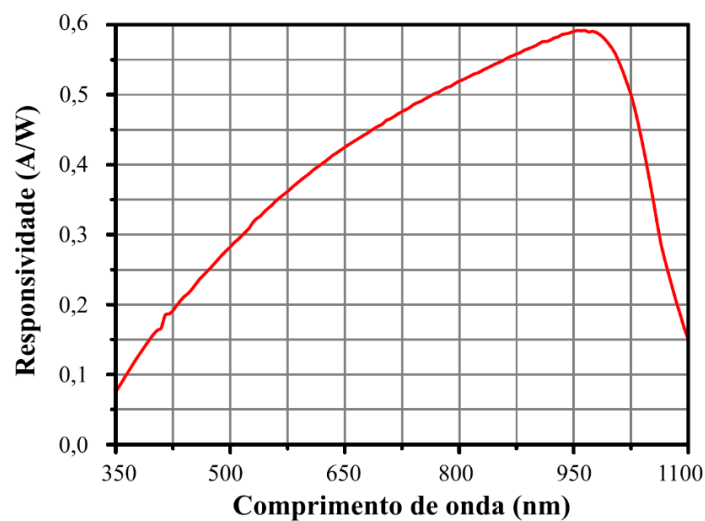


Figura 3-3 Curva de responsividade (em A/W) do fotodiodo SM05PD1A. Fonte:

<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SM05PD1A>.

3.1.2. Arranjo Experimental em Laboratório

Para gerar uma corrente elétrica compatível com de uma linha de distribuição de energia elétrica, foi desenvolvido um circuito em laboratório, onde foi possível obter correntes de 0 a 500 A. O aparato desenvolvido é composto um autotransformador para variar a tensão, um banco de resistores de potência com o objetivo de limitar a corrente de entrada e um transformador de corrente com fator de transformação de 1: 160 ligado em curto circuito. Como pode-se observar na Figura 3-4.

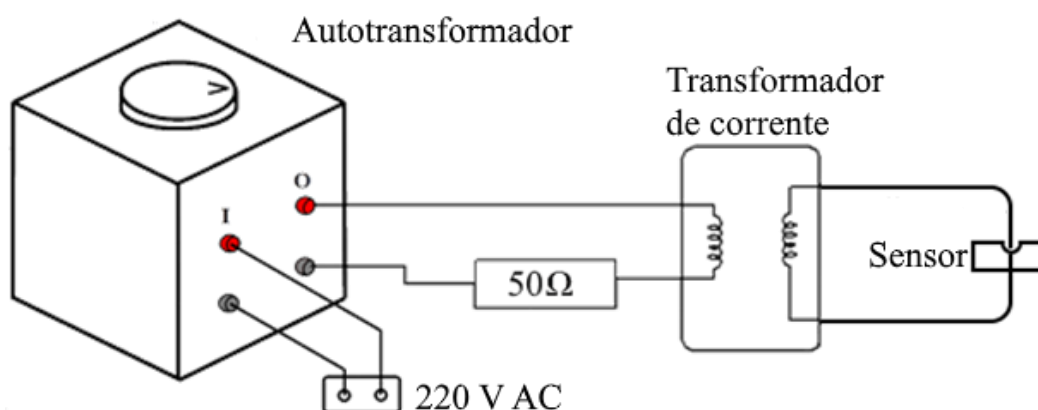


Figura 3-4 Representação do aparato para geração de uma corrente de alta intensidade.

O autotransformador é um Variac TDGC2-30 de 30 KVA utilizado para variar a tensão de entrada do circuito de 0 a 220 V, conectado à rede elétrica. A tensão de saída do variac é, então, aplicada em um transformador de corrente (TC) de 1: 160 em série com um banco de resistores de potência com resistência equivalente de 50 Ohms, limitando, assim, a corrente de entrada no TC a variações de 0 a 4,4 A. Com a variação de 0 a 4,4 A é possível obter 0 a 700 A na saída do TC em curto-circuito. Os valores de corrente obtidos com o aparato descrito acima são compatíveis com valores de corrente normalmente encontrados em linhas de transmissão (69 kV). O protótipo do sensor de corrente é, então, posicionado junto ao fio do TC em curto-circuito e a corrente é mensurada.

3.2. Métodos

3.2.1. Medidas de Análise polarimétrica

Foi realizado um estudo polarimétrico da resposta do sensor, analisando a polarização do sinal na saída do cristal por meio de um polarímetro (TXP 5004 – THORLABS). Para a

análise polarimétrica, foi montado um aparato experimental como o da Figura 3-1, retirando-se o último polarizador (Polarizador de Análise) e substituindo o fotodiodo pelo terminal do polarímetro (ver Figura 3-5). Devido às configurações do equipamento utilizado, cuja taxa máxima de amostragem é de 333 *Hz*, o sinal foi amostrado à essa taxa, suficiente para analisar uma onda de 60 *Hz*, de acordo com o Teorema de Nyquist.

Na Figura 3-5 é apresentada a configuração montada para a análise do ângulo de rotação de Faraday. O polarímetro utilizado mede o ângulo da direção de polarização da luz.

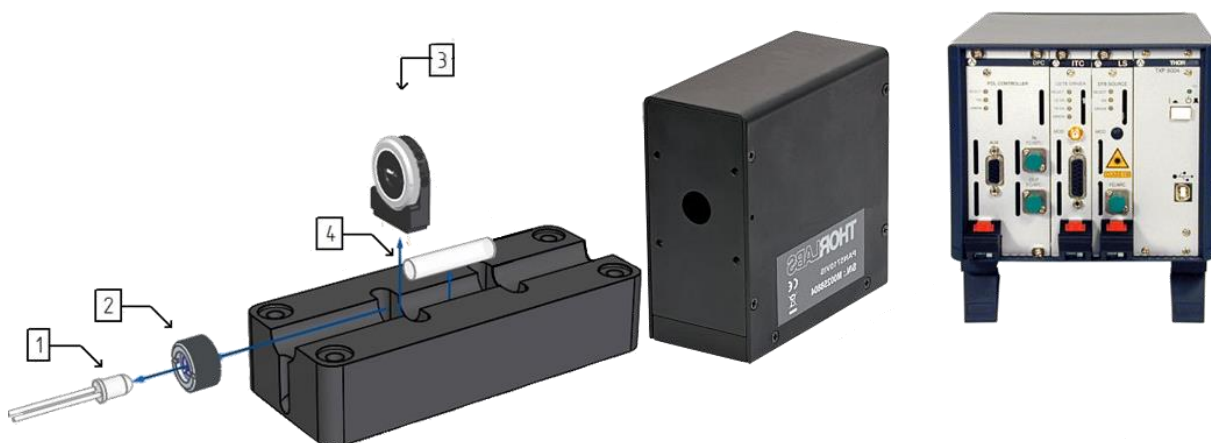


Figura 3-5 Configuração experimental montado para análise da rotação de Faraday

3.2.2. Medidas em laboratório

Na Figura 3-1 é possível observar a disposição dos elementos no transdutor desenvolvido. O feixe de luz gerado pela fonte óptica atravessa o primeiro polarizador, tornando-se linearmente polarizada, após essa etapa, a luz é introduzida no cristal TGG, que irá girar a direção de polarização do feixe luminoso de acordo com o campo magnético induzido pela corrente elétrica passante no condutor.

Após o feixe de luz passar pelo cristal de Efeito Faraday e sofrer a rotação na sua direção de polarização, atravessa o segundo polarizador, que irá atenuar o sinal luminoso de acordo com a rotação provocada pelo cristal. Essa etapa é denominada etapa de análise. O sinal óptico analisado pelo polarizador é, então, convertido pelo fotodiodo em sinal elétrico, que será posteriormente amostrado e quantizado, através de instrumentação eletrônica, no processo de digitalização para determinação da corrente elétrica. O circuito de instrumentação será abordado em seções posteriores desta dissertação.

3.2.3. Calibração do sensor

O sinal óptico convertido pelo fotodiodo em tensão elétrica é, então, filtrado e amplificado. A partir dos valores medidos em tensão alternada é gerado um gráfico com a curva de resposta do sensor. Os parâmetros da curva de calibração são obtidos a partir de análise de regressão e inseridos como entrada no microcontrolador. Este calcula o valor de corrente irá calcular a corrente elétrica utilizando esses dados.

3.2.4. Ensaio de exatidão

Além dos ensaios feitos em laboratório, foram realizados ensaios em um equipamento gerador de corrente com precisão na ordem de $0,01\text{ A}$ com o intuito de confirmar a precisão do equipamento desenvolvido. Na figura Figura 3-6 é apresentado o equipamento utilizado no experimento (HEXING ELETRICAL CO. LTD HX-P3001-C).



Figura 3-6 Equipamento gerador de corrente.

CAPÍTULO 4

4. Resultados

Foram realizados estudos de simulação numérica, onde foi considerado para comparação entre o calculado e o medido, uma corrente de 300 A. As características do cristal utilizado nos estudos experimentais foram usadas como dados de entrada da simulação. A polarização do sinal óptico modulado no sensor foi analisado utilizando um polarímetro, com objetivo de avaliar o nível de rotação da polarização da luz em função do campo magnético. Na seção 4.1.1 é apresentado o resultado obtido na simulação e comparado com os resultados experimentais do polarímetro, nas seções 4.1.2., 4.1.3. e 4.1.4 são apresentados os resultados experimentais obtidos utilizando fotodiodo e instrumentação eletrônica.

4.1. Ensaios em Laboratório

4.1.1. Análise Polarimétrica

Na Figura 4-1, pode-se observar o gráfico resultante de uma simulação, feita no *software* MATLAB, da rotação de Faraday em função da distância R do cristal ao fio. Para a simulação foram considerados os cálculos analíticos da equação (34) e os seguintes parâmetros: $V = -74,79 \text{ rad}/T \cdot m$ e $L = 0,028 m$, que são as propriedades do cristal utilizado nos experimentos e $I = 300 A$, um valor típico de corrente encontrado em linhas de transmissão.

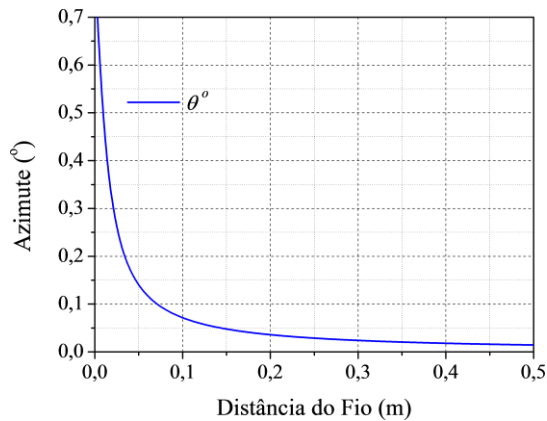


Figura 4-1 Simulação da variação, em graus, do ângulo de rotação de Faraday em função da distância do fio ao cristal

Na Figura 4-2 (a), é apresentada a resposta em termos da rotação no ângulo de polarização do sinal (azimute) para diferentes valores de corrente no fio condutor, de acordo com o aparato experimental apresentado na Figura 3-5. Analisando a rotação para valores de 0, 100, 200, 300, 400 e 500 A, foram obtidas variações máximas de 0° , $0,1857^\circ$, $0,3688^\circ$, $0,5568^\circ$, $0,7376^\circ$ e $0,9267^\circ$, respectivamente. Foi observado que a variação da amplitude em graus é linearmente proporcional ao valor de corrente passante no fio. Na Figura 4-2 (a) pode-se observar que, para o valor de 300 A, o valor do ângulo de rotação da polarização da luz é de aproximadamente $0,6^\circ$, compatível com os resultados apresentados na Figura 4-1. Quando comparado com os resultados obtidos na simulação, o estudo realizado no polarímetro apresenta o erro experimental de 13,09%.

Na Figura 4-2 (b), pode-se observar a resposta do cristal para o intervalo de amostras de 5120 a 5250, onde constata-se uma variação de amplitude pico-a-pico de $1,8534^\circ$. O comportamento oscilante do ângulo de polarização da luz se dá pelo fato de que a corrente elétrica da rede possuir uma forma de onda senoidal, e, conseqüentemente, o campo magnético variar da mesma maneira, fazendo com que, de acordo com a Equação (36), o ângulo de polarização tenha o comportamento apresentado nessa figura, gerando uma modulação senoidal no sinal óptico.

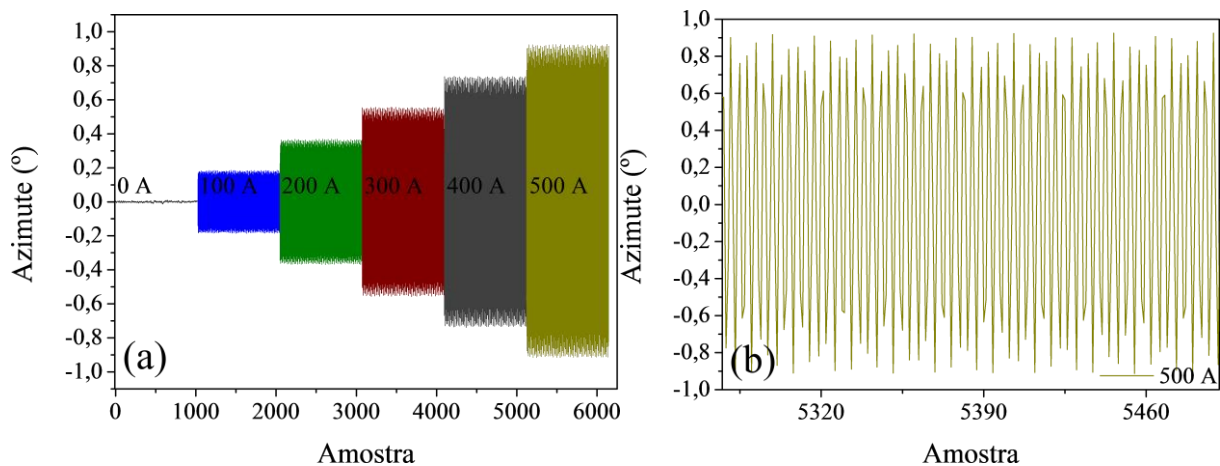


Figura 4-2 (a) Resposta em graus para 0, 100, 200, 300, 400 e 500 A. (b) Zoom na resposta do sensor para 500 A.

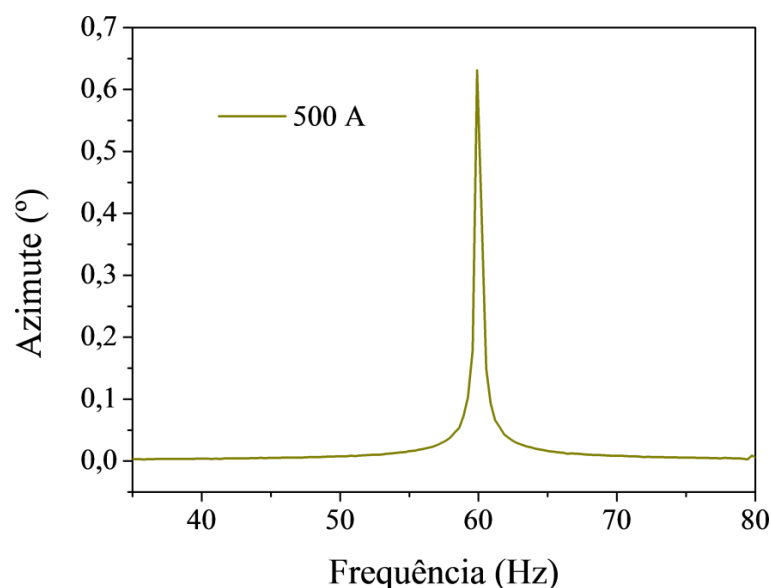


Figura 4-3 Resposta em frequência da rotação do plano de polarização do feixe óptico normalizada.

Na Figura 4-3, é apresentada a resposta em frequência do sinal amostrado. Utilizamos o software MATLAB para a análise, que foi feita por meio da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) dos dados obtidos no polarímetro. A análise foi feita para uma corrente de 500 A no fio. Amostramos 1024 pontos a uma taxa de 333 amostras por segundo. É possível observar que a frequência de oscilação do sinal gerado é exatamente 60 Hz, casando com a frequência da rede elétrica.

4.1.2. Análise por Comprimento de Onda e Rotação entre Polarizadores

Dentre os diversos estudos realizados nesse trabalho, foram realizadas análises em relação ao comprimento de onda utilizado no transdutor e a rotação entre os polarizadores da etapa de polarização e da etapa de análise (ϑ). Como descrito anteriormente, a Constante de Verdet depende do comprimento de onda luz que atravessa o dielétrico, portanto se fez necessário o estudo em função do comprimento de onda. Nessa etapa, foram realizadas medidas com três comprimentos de onda distintos: 631 nm, 525 nm e 645 nm. Simultâneo ao estudo em relação ao comprimento de onda, foi analisado o comportamento do sensor em relação ao ângulo ϑ entre os polarizadores, pois a potência luminosa transmitida pelo polarizador é função do ângulo de incidência entre o eixo de polarização da luz e do polarizador.

Na Figura 4-4 podemos observar os resultados obtidos nos estudos relacionados ao comprimento de onda e ao ângulo de análise. O comportamento das curvas acima só pode ser entendido se relacionados com o comportamento da constante de Verdet em função do

comprimento de onda e com a responsividade do fotodiodo utilizado no experimento, como podemos ver nos dois gráficos da Figura 4-4.

Sabendo-se que a constante de Verdet aumenta com a diminuição do comprimento de onda da luz propagante no cristal de Efeito Faraday (BARNES e B. PETWAY, 1992), no caso do estudo supracitado, o cristal é o mesmo utilizado nesta dissertação (TGG). O gráfico do comportamento da Constante de Verdet pode ser observado na Figura 2-6. A responsividade em Amperes/Watt do fotodiodo também é dependente da frequência da luz incidente, porém é inversamente proporcional. Vale salientar que as curvas obtidas nessa seção do trabalho são influenciadas diretamente pelo comportamento dos componentes citados (cristal e fotodiodo). Apesar de apresentar a maior Constante de Verdet, a luz no comprimento de onda de 465 nm tem sua resposta consideravelmente atenuada pela responsividade do fotodiodo. Já a luz com $\lambda = 631\text{ nm}$, apesar de representar a maior responsividade das três, sofre menor rotação no cristal, devido à menor Constante de Verdet. A luz com $\lambda = 525\text{ nm}$ é a que apresenta melhor resposta nas curvas observadas, pois possui uma constante de Verdet maior que $\lambda = 631\text{ nm}$ e responsividade maior que $\lambda = 465\text{ nm}$.

A fonte luminosa escolhida para a confecção do protótipo, porém, foi a de $\lambda = 631\text{ nm}$, apesar de $\lambda = 525\text{ nm}$ apresentar melhor resposta. A rotação para o comprimento de onda de 525 nm é maior devido à sua maior constante de Verdet, permitindo que uma maior potência luminosa incidisse sobre o fotodiodo, e este saturava com menores valores de corrente, impossibilitando a leitura de maiores faixas de corrente elétrica. A escolha do comprimento de onda de 635 nm permite o sensoriamento de uma maior faixa de corrente elétrica (0 a 500 A). O ganho do resistor de carga do fotodiodo poderia ser diminuído, porém iria diminuir a precisão das medidas. A luz com $\lambda = 465\text{ nm}$ apresentou uma curva de resposta muito abaixo das demais, consequentemente uma pior relação sinal-ruído (*Signal-Noise Ratio* – *SNR*). Considerando o discutido anteriormente, o LED de 631 nm se tornou mais adequado à aplicação.

Além do estudo por comprimento de onda, também foram realizados ensaios em função do ângulo de análise (entre os polarizadores). Pode-se observar na Figura 4-4 que, para os três comprimentos de onda, a resposta do sensor teve maior amplitude na configuração com 45° (0 a 900 mV contra 0 a 375 mV da configuração com 90°). Porém, na etapa de tratamento do sinal elétrico recebido do fotodiodo, uma maior tensão de entrada no circuito saturava os amplificadores operacionais utilizados no circuito de condicionamento do sinal, diminuindo a

faixa mensurável de corrente do sensor em relação às correntes medidas e aumentando o erro. Dessa forma, a configuração utilizada na produção do sensor foi a de 90° . A partir desse ponto do texto, subentende-se que todos os gráficos são obtidos a partir da configuração de 90° e com fonte luminosa de 631 nm).

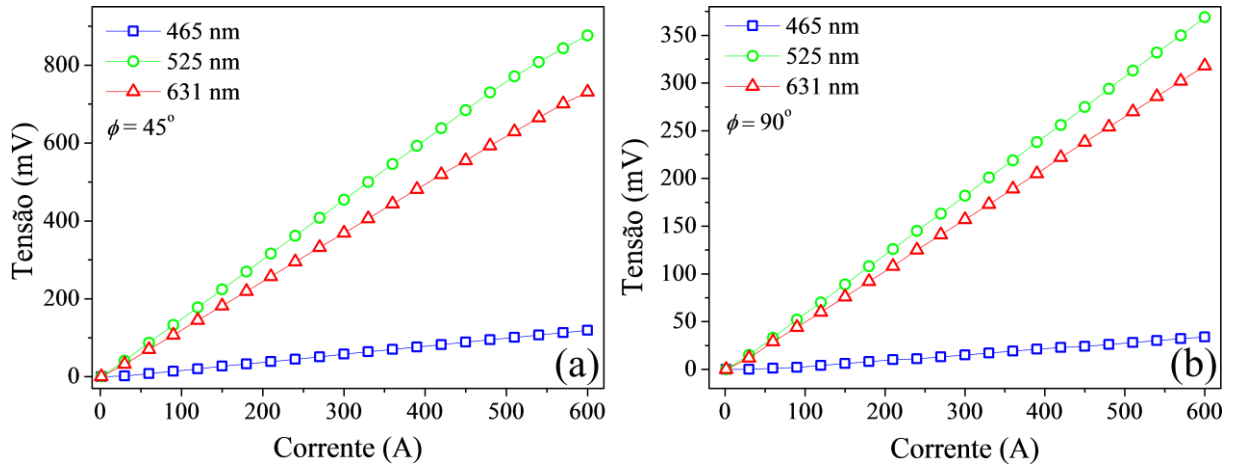


Figura 4-4 Resposta do sensor em função do comprimento de onda. (a) a 90° e (b) a 45° .

Na Figura 4-5, foi analisada a resposta do sensor em relação à distância do fio ao cristal, no intervalo de $1,71$ a $11,46\text{ cm}$, para uma corrente fixa em 100 A . Com esse estudo, foi obtida uma variação de 450 mV em relação à distância mínima e máxima consideradas. Por meio de regressão, a curva de tendência dada pela expressão $V = 967,52d^{-1,036}$ e $R^2 = 0,9991$ foi obtida. Desta forma, a resposta do sensor diminui com aproximadamente o inverso da distância ao fio. Este comportamento se deve ao fato de que a intensidade do campo magnético gerada em um fio varia com r^{-1} , estando de acordo com a lei de Ampère aplicada a um fio linear (JACKSON, 1975).

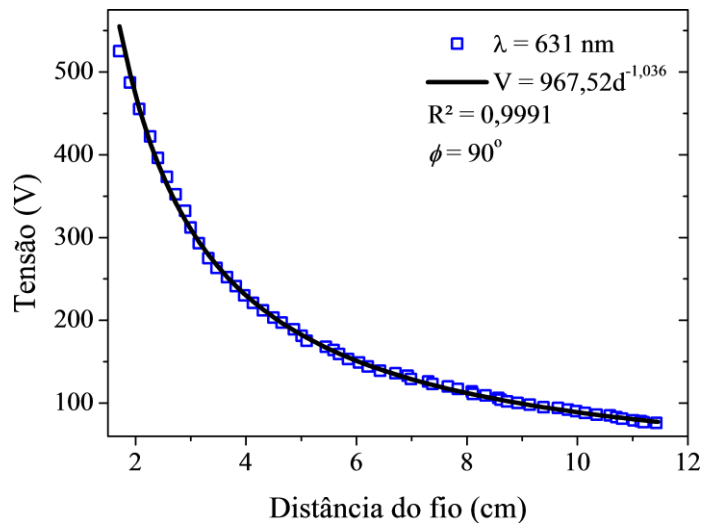


Figura 4-5 Resposta do sensor em função da distância ao fio.

4.1.3. Ensaio de exatidão

Para validação do sensor e análise do grau de exatidão do protótipo, foram realizados ensaios na empresa ELETRA. No ensaio foi utilizado um gerador de corrente elétrica (HXP-P3001C da HEXING ELECTRICAL CO.) com precisão de 0,001 A, utilizado na calibração de medidores de energia. No ensaio, foram medidos valores de corrente de 0 a 100 A a um passo de 10 A. Na Figura 4-6 é possível observar o resultado obtido. A partir das medições realizadas, foi calculada uma curva de tendência dada pela expressão $V = 2,134 \cdot i_{rms} + 1,182$ e $R^2 = 0,9992$, que demonstra o grau de precisão do protótipo.

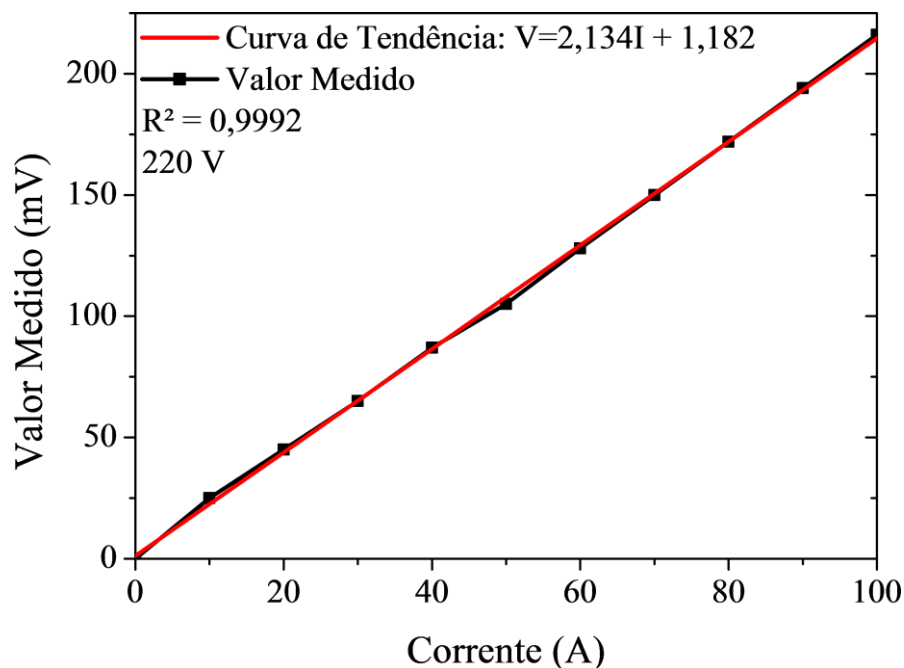


Figura 4-6 Ensaio elétrico realizado com gerador de corrente.

4.1.4. Calibração do Sensor

Na Figura 4-7, é apresentada a resposta do sensor, através da leitura da tensão alternada de saída do fotodiodo em função da corrente no fio, já com amplificação, do sinal obtido no fotodiodo. Foi utilizado um LED de 631 nm com potência de 1,1 mW e a configuração de 90°, conforme a Figura 4-7. Foi possível obter uma variação de aproximadamente 1200 mV para um intervalo de 0 a 500 A. A curva de resposta do sensor apresenta comportamento linear em função da corrente, como pode-se ver na Figura 4-7, e, por meio da análise de regressão, chegamos à curva de tendência dada por $V = 2,461 \cdot i_{rms} - 1,004$, bem como o valor de $R^2 = 1,000$. Para a Figura 4-7 (a), foi utilizado um passo de medida de 25 A, enquanto, para

a Figura 4-7 (b), o passo foi de 1 A. A curva da Figura 4-7 (b) foi obtida utilizando a faixa de corrente de 150 a 175 A. Ambas as curvas (Figura 4-7 (a) e (b)) apresentaram comportamento linear, com uma razão de aproximadamente 2,4 mV/A. Por meio da análise de regressão, foi obtida a curva de tendência, a qual também se apresentou como função linear expressa por $V = 2,5346 \cdot i_{rms} - 1,302$ $R^2 = 0,9991$.

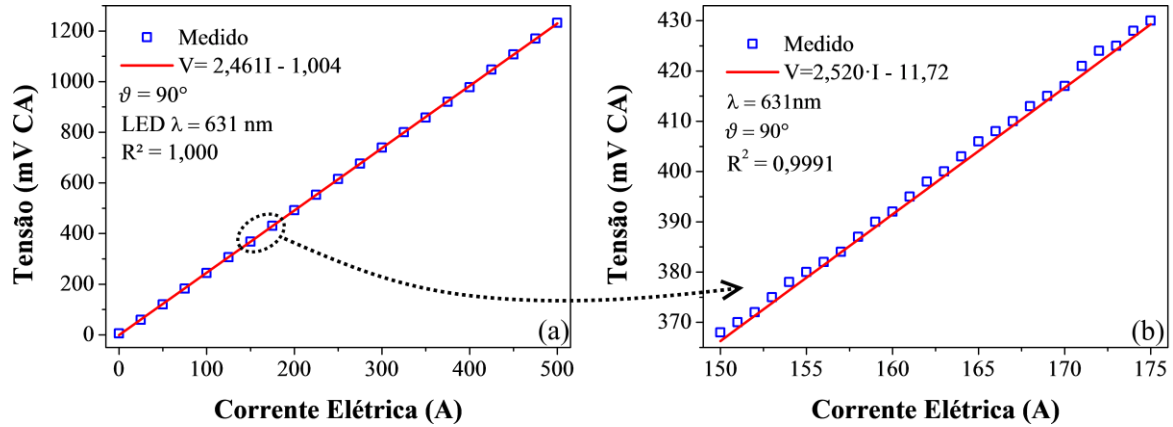


Figura 4-7 Leitura de corrente de 0 a 500 A com zoom na faixa de 150 a 175 A

O sensor foi calibrado para realizar medições na faixa de 0 a 500 A, apresentando resposta aproximadamente linear em na faixa de corrente de 10 a 500 A. Entretanto na faixa de 0 a 10 A, a resposta do sensor teve comportamento não-linear. Tal comportamento era esperado devido ao comportamento cossenoidal da transmissividade do polarizador de análise, de acordo com a lei de Malus. Dessa forma, foram obtidas duas curvas de calibração para o sensor, uma para faixa de 0 a 10 A e outra para faixa de 10 a 500 A. Na Figura 4-8, é apresentada a curva de resposta do sensor para faixa de 0 a 10 A, cuja curva de resposta é dada por $V = -0,0072 \cdot i_{rms}^3 + 0,146 \cdot i_{rms}^2 + 0,5061 \cdot i_{rms} + 2,2724$ e $R^2 = 0,9999$.

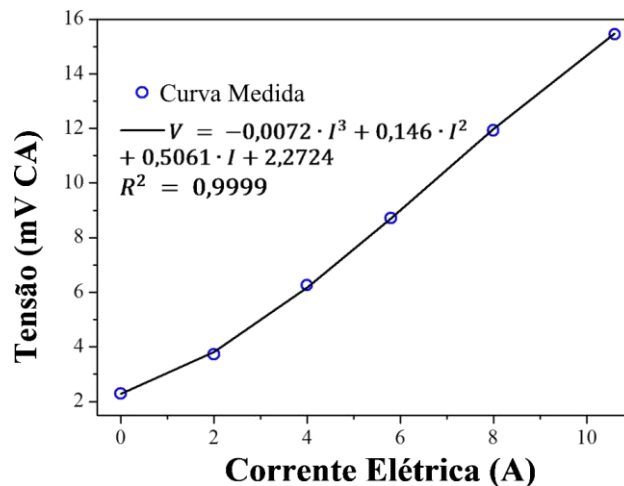


Figura 4-8 Curva de calibração do sensor faixa de operação de 0 a 10 A.

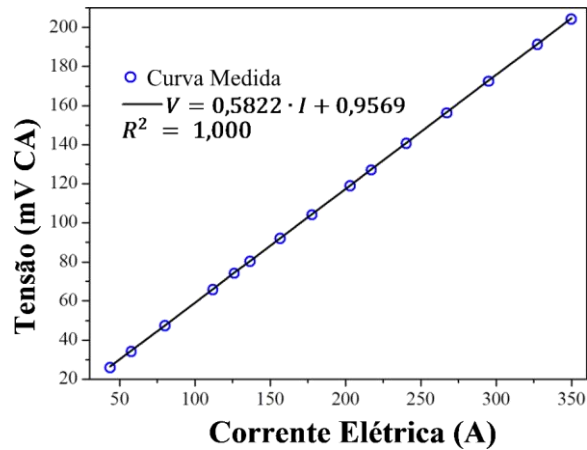


Figura 4-9 Curva de calibração do sensor faixa de operação de 10 a 350 A.

Na Figura 4-9, é apresentada a curva de resposta do sensor para faixa de 10 a 350 A, cuja curva de resposta é dada por $V = 0,5822 \cdot i_{rms} + 0,9569$ e $R^2 = 1,000$. Como observado, o sensor apresenta resposta linear para essa faixa de operação. Os coeficientes das equações de primeira e terceira ordem são obtidos a partir de análise de regressão e são utilizados para calcular a corrente elétrica passante no fio.

4.2. Protótipo

4.2.1. Projeto Mecânico e Fabricação

O sensor desenvolvido é formado por transdutor, placa eletrônica, estrutura mecânica e painel solar com controlador de carga. O projeto mecânico foi desenvolvido e modelado no *software* Solid Edge. Na Figura 4-10 pode-se observar a organização do protótipo do sensor. A parte superior (1A) corresponde à tampa do sensor, onde é fixada a placa solar que irá fornecer alimentação e o transdutor (2). A plataforma onde é fixado o painel solar tem um recorte com inclinação de 15° para que a água da chuva e folhas de árvores possam escorrer e não prejudicar a captação da luz do sol. A parte inferior (1B) possui um recorte para acomodar a bateria de *back-up* e a placa embarcada com modem GPRS. Nos períodos em que há iluminação solar, o painel solar alimenta o sensor e recarrega a bateria, quando não há, o sensor é alimentado pela bateria. O sistema de *back up* foi dimensionado para suportar até 2 dias sem a presença de iluminação natural, ou seja, alimentado somente por bateria. Dessa forma, a bateria é capaz de fornecer energia ao sensor por até dois dias consecutivos de alta nebulosidade. A base e a tampa da caixa do sensor são presas uma à outra através de presilhas e parafusos. A disposição dos

componentes foi pensada de tal maneira que a maior massa (bateria) se encontra na parte inferior do protótipo, a fim de fornecer estabilidade ao protótipo.

As partes inferior e superior, quando unidas, possuem um furo transversal para acomodação do cabo de energia elétrica da linha de transmissão/distribuição a ser monitorada. Da forma como foi projetado, o sensor pode ficar pendurado no fio entre os postes ou fixado na cruzeta de um poste com o fio atravessando, funcionando como um isolador, já utilizado normalmente em linhas.

Para atender às exigências elétricas e mecânicas, utilizou-se o material poliacetal (Polioximetileno - POM) como material constituinte do protótipo do sensor, usinado em máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado). Poliacetal é um tipo de polímero largamente usado na fabricação de peças com precisão e de pequeno porte, este plástico de engenharia apresenta alta resistência ao impacto e à fadiga, baixa absorção à umidade, rigidez dielétrica superior a 50 kV/mm e na versão em cor preta, fornece isolamento luminosa. Ademais, é um plástico fácil de ser usinado mecânica e manualmente.

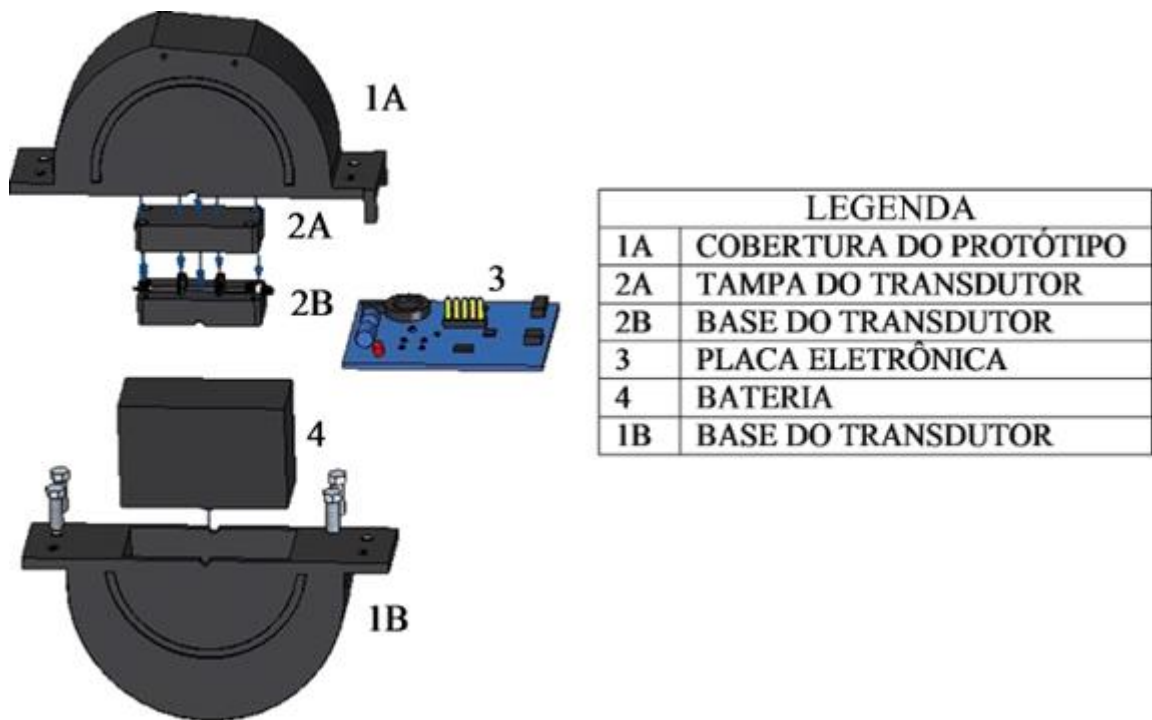


Figura 4-10 Visão Geral do Protótipo com os componentes em detalhes

4.2.2. Instrumentação Eletrônica

Com o objetivo de realizar medições de corrente elétrica 24h/dia, o projeto de alimentação elétrica do protótipo dispõe de um painel solar, como fonte de alimentação elétrica primária, e bateria, como fonte de alimentação secundária. Dessa forma, o medidor de corrente elétrica proposto atuará continuamente, coletando dados e enviando à um servidor *web* que disponibilizará os dados para os técnicos da concessionária por meio de um *website*. A bateria alimenta o circuito eletrônico em horários noturnos, em períodos chuvosos ou dias com pouca luminosidade, quando o painel solar não fornece energia suficiente para alimentar o sistema. A bateria funciona como *backup* de energia, alimentando o circuito eletrônico por um período de até dois dias. É interessante salientar que, para realizar o chaveamento dessas duas fontes de energia foi necessário utilizar um controlador de carga.

O circuito do fotodiodo é composto por um filtro passa-baixa, uma fonte de alimentação e uma resistência de carga. A intensidade da excitação do fotodiodo é diretamente proporcional a tensão sobre a resistência de carga e, conseqüentemente, a intensidade da corrente elétrica no condutor. No intuito de promover maior precisão e imunidade ao ruído, este último inerente à qualquer sistema eletrônico, utiliza-se um filtro passa-faixa na frequência da rede elétrica da concessionária, neste caso, 60 Hz. Após a filtragem, o sinal elétrico é amplificado e, utilizando um conversor analógico/digital (A/D) que possui uma precisão de $305 \mu V$ para uma referência de 0 a 5 V com 14 bits de resolução, realiza-se uma amostragem do sinal elétrico a uma frequência de 5 kHz.

Na Figura 4-11 é apresentado o circuito da entrada analógica do circuito do sensor. No terminal 2 do conector, nomeado de CN1, é conectado o anodo do fotodiodo, já os terminais 1 e 3 são utilizados para polarizar o fotodiodo e filtrar o sinal de entrada, esse circuito é o recomendado pelo fabricante. Após o processo de conversão do sinal óptico em elétrico através do circuito descrito, o sinal é introduzido no circuito de condicionamento, onde será retirada a componente DC (*Direct Current* – DC) indesejada e adicionada uma componente DC conhecida de 2048 mV. O sinal, então é filtrado com um filtro de primeira ordem com frequência de corte em 60 Hz a fim de retirar o ruído proveniente do módulo GPRS e amplificado com um limite superior em 4096 mV. Após esse processo, o sinal é entregue ao conversor A/D para ser quantizado e amostrado a uma taxa de 5 kHz.

The schematic diagram illustrates the ADC module's internal circuitry. It features three main components: the MAX11101 ADC (U2), the OPA4376 op-amp (U1), and two precision centration voltage references, LM4040-2048 (Z1) and LM4040-4096 (Z2).

MAX11101 ADC (U2) Connections:

- Power and Ground:** DVDD (pin 3) is connected to 3V3, and AGND (pin 4) is connected to GND. VREF (pin 6) is connected to 5V through a 100nF capacitor (C11).
- Reference:** REF (pin 7) is connected to GND.
- Control:** SCLK (pin 10) and CS (pin 9) are connected to the microcontroller. DOUT (pin 2) is connected to the microcontroller.
- Input:** AIN (pin 5) is connected to the output of the first op-amp (OUT AMPB1).

OPA4376 Op-Amp (U1) Connections:

- Power and Ground:** V+ (pin 5) is connected to 5V, and V- (pin 6) is connected to GND. Both pins have 100nF capacitors (C4, C5) connected to ground.
- Input:** IN AMPA1 (pin 3) is connected to the microcontroller. IN AMPB1 (pin 7) is connected to the output of the second op-amp (OUT AMPB1).
- Output:** OUT AMPA1 (pin 1) is connected to the microcontroller. OUT AMPB1 (pin 8) is connected to the AIN pin of the MAX11101.

Voltage References (Z1, Z2):

- LM4040-2048 (Z1):** VREF 2048 (pin 1) is connected to 5V through a 1K resistor (R2). The output (pin 2) is connected to the microcontroller. The reference is biased by a 5V source through a 47K resistor (R5) and a 1K resistor (R6).
- LM4040-4096 (Z2):** VREF 4096 (pin 1) is connected to 5V through a 1K resistor (R3). The output (pin 2) is connected to the microcontroller. The reference is biased by a 5V source through a 47K resistor (R5) and a 1K resistor (R6).

Other Components:

- Capacitors:** C1 (100nF), C2 (100nF), C3 (100nF), C4 (100nF), C5 (100nF), C6 (100nF), C7 (100nF), C8 (100nF), C9 (100nF), C10 (100nF), C11 (100nF).
- Resistors:** R1 (1K), R2 (1K), R3 (1K), R4 (1M), R5 (47K), R6 (1K), R7 (1K).

Na Figura 4-12 é apresentado o esquemático do circuito eletrônico correspondente ao microcontrolador (*Microcontroler Unit* – MCU), o conector para encaixe do cartão de memória (padrão MicroSD), a fonte de corrente utilizada para alimentar o LED do transdutor, circuitos de *Pull-Up* externos, módulo GPRS e relógio em tempo real (*Real-Time Clock* – RTC).

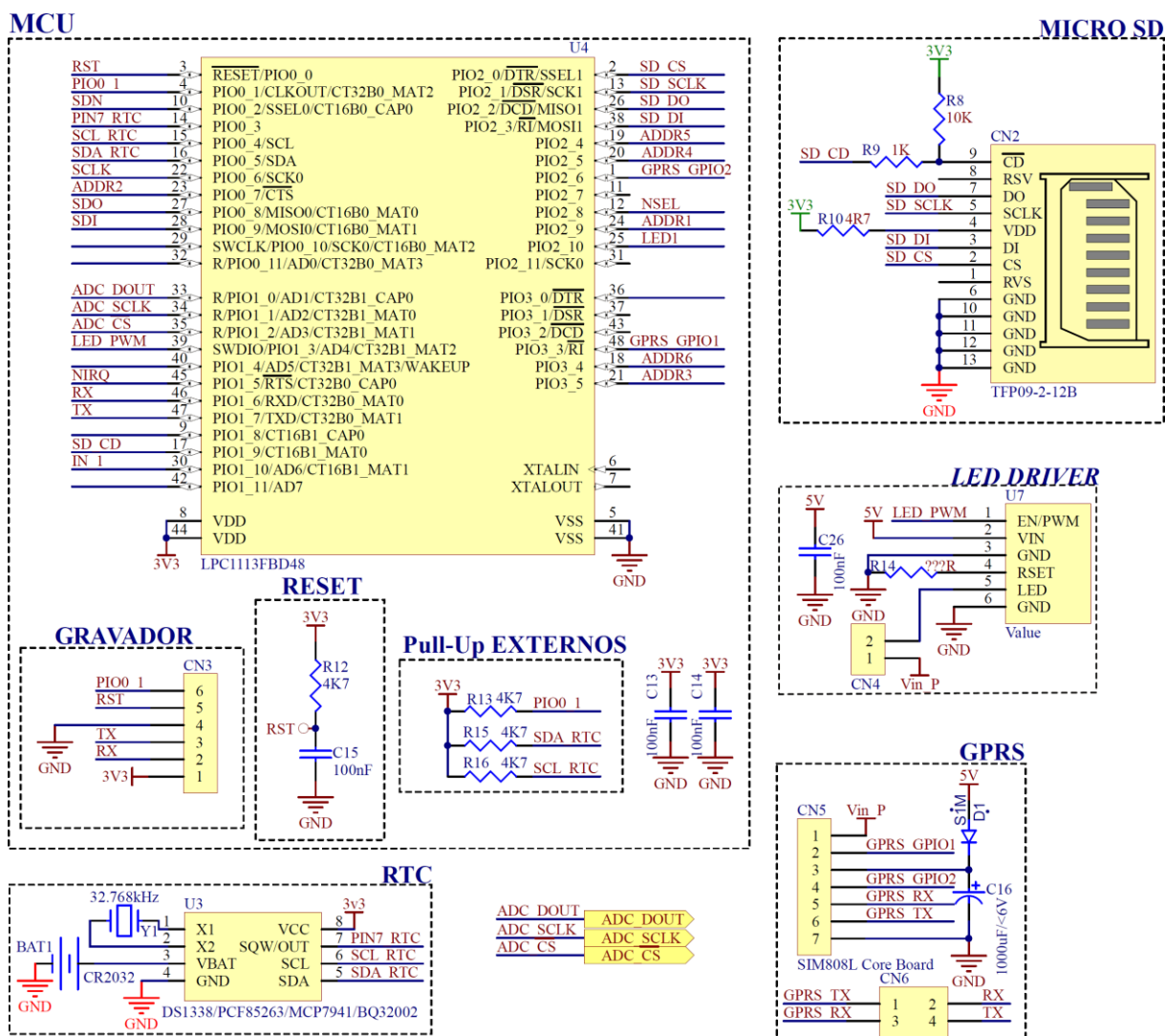


Figura 4-12 Esquemático do circuito eletrônico

Para relacionar os valores obtidos na amostragem com os dados da corrente elétrica no condutor, o microcontrolador realiza o cálculo do valor eficaz dos valores obtidos através do conversor A/D e, utilizando como referência as curvas de correlação obtidas na calibração do equipamento, calcula o valor da corrente no fio.

Para realizar a transferência dos dados captados após a instalação, o equipamento possui, integrado ao sistema embarcado, um módulo GPRS que efetua a transmissão dos dados obtidos de intensidade da corrente elétrica, a data e o horário referente a medição para um servidor local, em períodos de um minuto. Os dados são apresentados para concessionária em uma página na *Internet* para que seja possível realizar o monitoramento da linha onde o medidor é instalado. Além de enviar os dados para o servidor da concessionária, o medidor de corrente também pode salvar um histórico das medidas no cartão de memória instalado na placa de circuito impresso (PCI).

Na Figura 4-13 é apresentado um diagrama de blocos do medidor de corrente. Os dados de corrente são enviados através de rede GPRS para o servidor da companhia elétrica e são exibidos na página *web* e a equipe de monitoramento irá acompanhar o comportamento das cargas. A calibração do equipamento é realizada utilizando-se de medidores de corrente comerciais com alta precisão e, através de curvas de digressão, os parâmetros ópticos são determinados. Após o cálculo dos parâmetros da curva de correlação, os parâmetros ópticos são configurados remotamente, utilizando a *interface* gráfica do *website*.

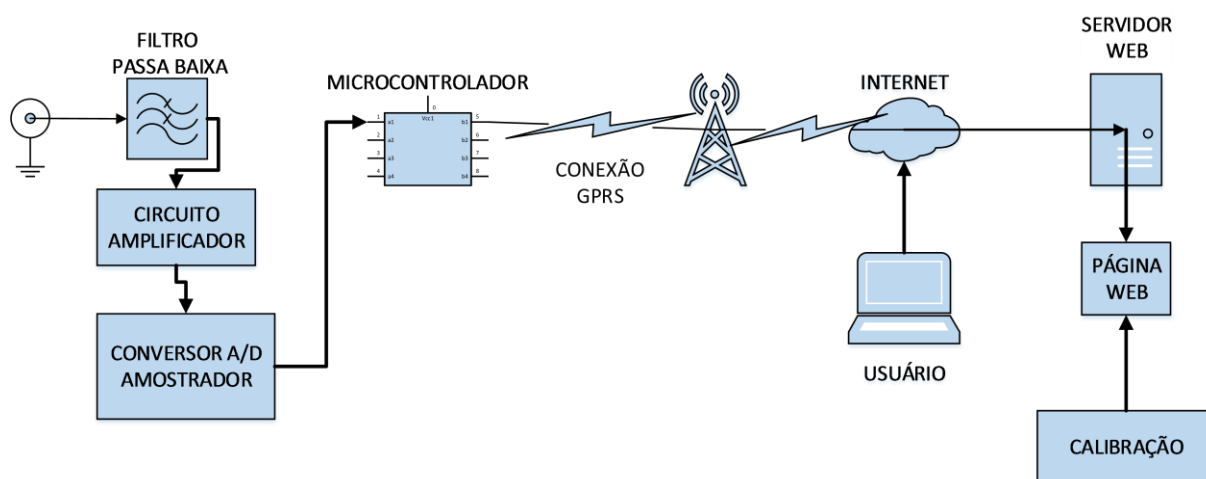


Figura 4-13 Diagrama de blocos do sistema de medição remota.

4.2.3. Instalação

Procedimentos de instalação de um equipamento em uma linha de distribuição ou transmissão são perigosos e colocam em risco a integridade dos operadores técnicos que realizarão a instalação do protótipo. Dessa forma, com o intuito de reduzir os riscos inerentes à instalação e, também, validar o *design* mecânico do protótipo quanto a facilidade de manuseio do equipamento, o procedimento de instalação foi simulado em uma rede elétrica de treinamento da CELPA, ou seja, uma rede desligada. Apesar do uso de uma rede desligada para treinamento, o procedimento de instalação do protótipo foi feito observando as normas técnicas de instalação de equipamentos elétricos e de manobras em linhas de transmissão (NR10), no intuito de viabilizar o treinamento dos técnicos.

Na Figura 4-14, apresenta-se o protótipo proposto instalado em uma das fases da linha de treinamento. A imagem destaca a estrutura do sensor, placa solar, chave de controle de carga e controlador de carga.

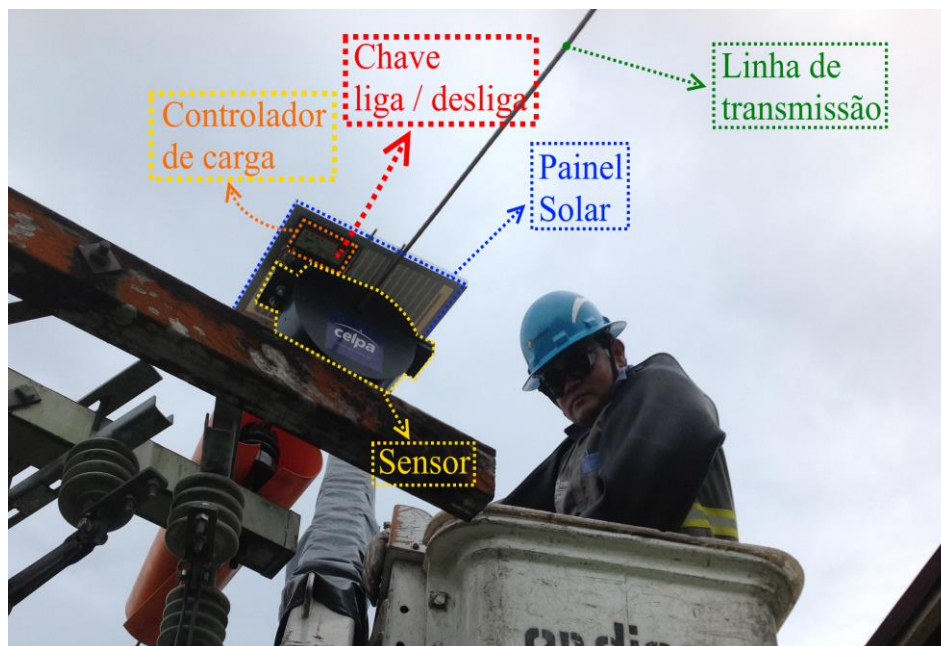


Figura 4-14 Instalação na rede desligada.

Na Figura 4-15, é apresentado o protótipo instalado e em operação, em uma linha de distribuição da CELPA, próximo a um alimentador no bairro pedreira em Belém-PA. O protótipo para medição de corrente é instalado diretamente na linha de alta tensão e fica fixo ao poste através da cruzeta. O equipamento deve ser instalado na rede e, após isso, as aferições são enviadas automaticamente para uma página *web* que exibe os valores de corrente instantâneos. Como já foi dito anteriormente, os parâmetros de calibração do sensor são inseridos remotamente através da página *web*.



Figura 4-15 Sensor instalado na linha de 13,8 kV

4.2.4. Pagina Web e Acesso Remoto

Atualmente, a possibilidade de transmissão remota das informações, referentes às medidas realizadas pelo equipamento da rede, torna o processo cômodo e econômico à concessionária elétrica. Ademais, o rápido acesso às informações da rede, sem a necessidade do envio de equipe técnica ao local específico, agiliza o processo de monitoramento e, além disso, é possível realizar o acompanhamento diário, ou até mesmo instantâneo, da intensidade da corrente elétrica na linha de transmissão monitorada, evitando sobrecargas ou defeitos na rede elétrica.

Considerando todos os benefícios adquiridos através do monitoramento remoto, o sensor óptico de corrente elétrica proposto neste trabalho possui integrado ao sistema embarcado um módulo GPRS SIM800, capaz de conectar-se à *Internet* (2G/3G) e enviar para um servidor local os pacotes de dados referentes à um intervalo de medidas. O sistema embarcado realiza transmissões de pacotes a cada minuto, contendo o valor da média de 50 medidas. O servidor local recebe os dados e apresenta-os em uma *interface* amigável para o usuário final, nesta situação o técnico da concessionária. A *interface* do *software* foi desenvolvida em Java e hospedada em um servidor *web*, com o intuito de disponibilizar o acesso da concessionária aos dados referentes à corrente elétrica. A hospedagem do site em um servidor *web* possibilita o acesso à informação de qualquer máquina ou, até mesmo, de um dispositivo móvel.

Para permitir acesso aos dados dos sensores ópticos instalados na rede elétrica da concessionária, o sistema dispõe de uma página *web*. Na Figura 4-16 é apresentada a tela de *login* do sistema. Observe que para acessar o sistema da concessionária, o técnico responsável precisa fornecer um nome de usuário e uma senha.

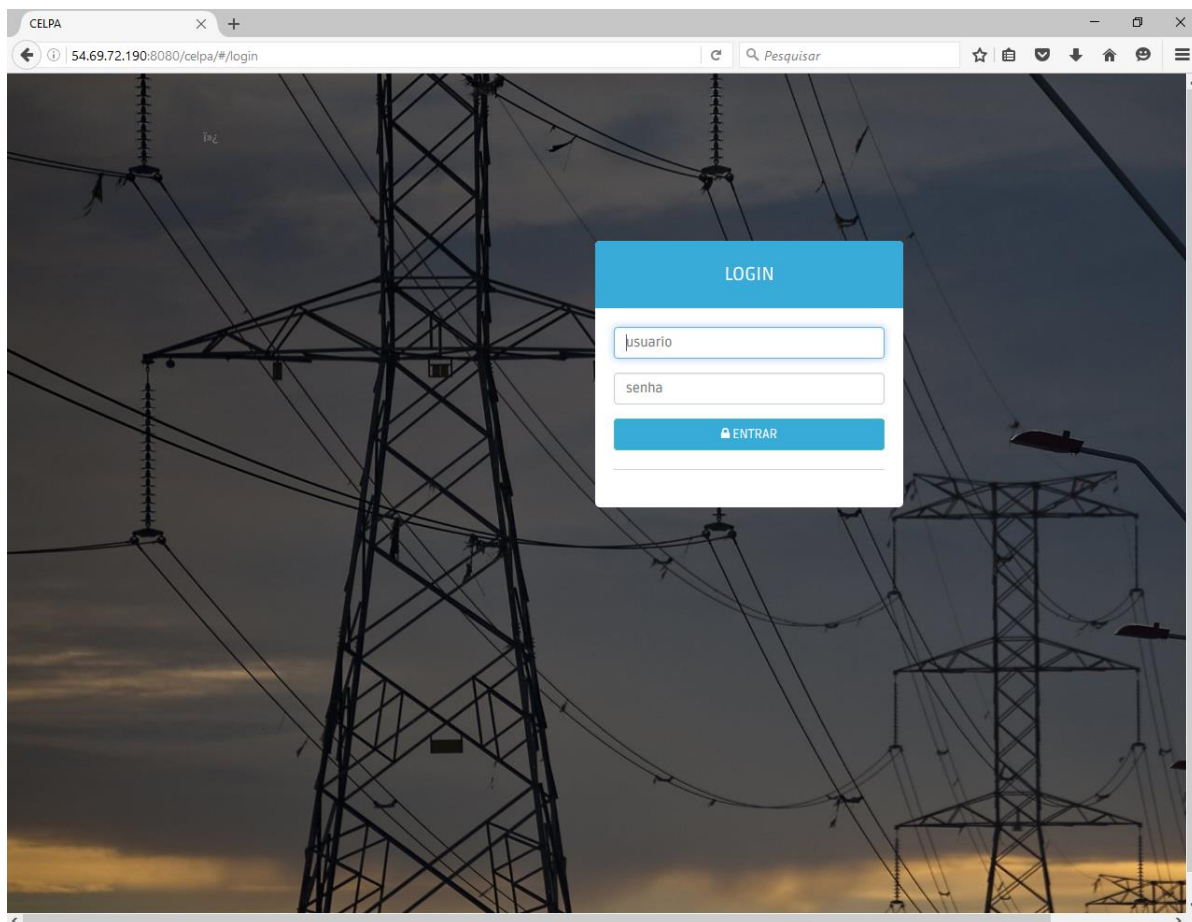


Figura 4-16 Tela de login da página WEB.

Após fornecer os dados de acesso ao *website*, o usuário poderá monitorar a intensidade da corrente elétrica. Como dito anteriormente, a calibração do equipamento é realizada antes da instalação e os parâmetros da curva correlação são fornecidos através da página *web*. Na Figura 4-17, é apresentada a opção ‘parâmetros ópticos’ onde são especificados os coeficientes das curvas de calibração do transdutor óptico, como obtidos e apresentados na Figura 4-8 e Figura 4-9. Observe que, a calibração do equipamento é constituída de duas curvas de calibração, são elas: uma equação de terceira ordem e uma equação linear.

Handwritten annotations in the image:

- Coeficientes da equação de terceira ordem (pointing to A1, B1, C1, D1)
- Coeficientes da equação linear (pointing to A2, B2)

Ativo	A1	B1	C1	D1	A2	B2	Lim	Editar	Remover
-	0	0	1	0	0	1	10		
Ativo	0.0035	-0.1058	1.7108	-3.302	1.654	1.4176	16		

Figura 4-17 Parâmetros Ópticos.

Na Figura 4-18 são apresentados, no *website*, os valores instantâneos da corrente elétrica. Observe que, o sistema dispõe de uma tabela que apresenta, em ordem de horários, os valores de corrente elétrica recebidos pelo servidor local. É importante ressaltar que os valores de corrente sofrem flutuações da própria rede elétrica da concessionária, variando alguns pontos de uma medida para outra.

78.882
79.665
81.288
82.741
84.229
85.457
86.233
86.352
86.783
86.642
86.113
86.310
86.740
85.167
85.647
86.113

Figura 4-18 Medidas enviadas pelo sensor.

Na Figura 4-19, é apresentado o gráfico dos valores de corrente elétrica de acordo com os horários. Observe que o gráfico possui uma tendência crescente em relação à hora do dia confirmando um maior consumo de energia elétrica no período noturno. Além disso, o consumo de energia no período da madrugada na região onde o protótipo foi instalado é relevante.

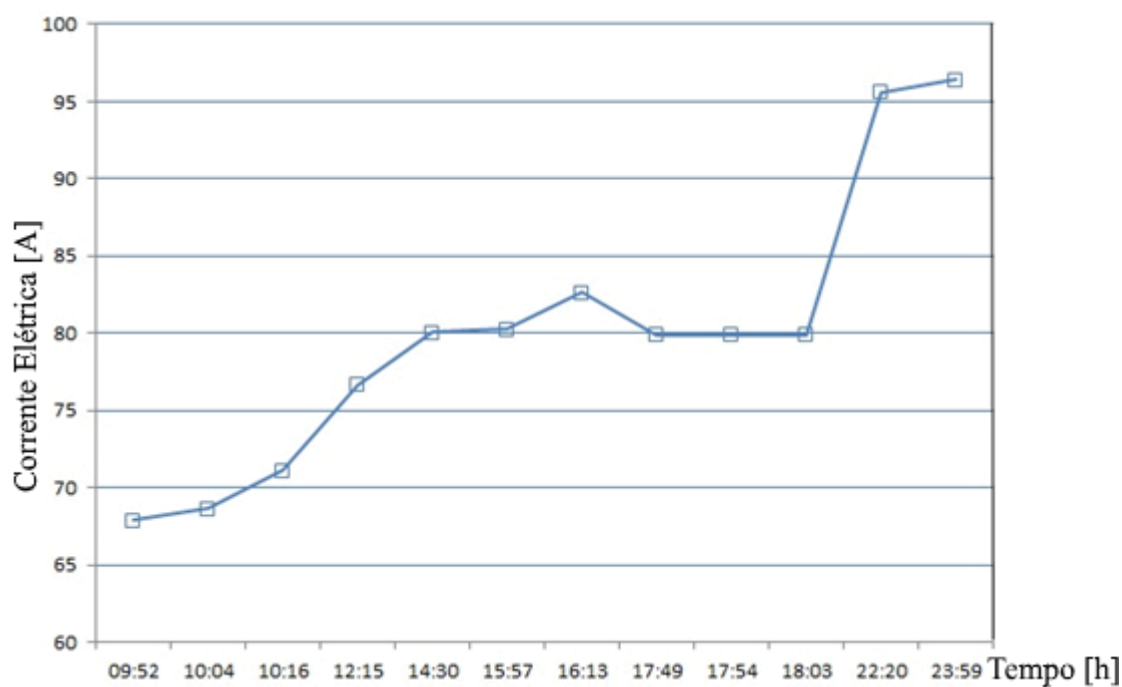


Figura 4-19 Gráfico dos valores de corrente ao longo do dia.

CAPÍTULO 5

5. Conclusões

5.1. Conclusão

Nesse trabalho foi aplicado um método de aferição da corrente elétrica, utilizando Efeito Faraday, em um equipamento para uso em linhas de distribuição e transmissão de energia.

O monitoramento da corrente elétrica nas linhas de energia das companhias de energia elétrica é de grande importância, pois falhas e fraudes podem ser evitadas através da análise desse parâmetro.

Foi realizado um estudo analítico para obtenção do ângulo de rotação. Para o estudo, foram utilizados os parâmetros do TGG empregado na fabricação do medidor de corrente. Também foram feitos experimentos com um polarímetro para medir a rotação da polarização da luz imposta pelo campo magnético gerado pela corrente passante no fio e os resultados obtidos nos dois estudos foram compatíveis.

Foram realizados ensaios elétricos em uma empresa de fabricação de medidores de energia para comprovação da precisão do sensor e foi obtido um valor de $R^2 = 0,9992$, mostrando que o equipamento é confiável comparando-se a um equipamento gerador de corrente com precisão de 0,01 A.

O sensor se mostrou confiável e preciso para faixas de corrente de 0 a 500 A. Através do método de regressão, o sensor é calibrado e os parâmetros são inseridos como entrada para a determinação da corrente elétrica.

Com base no exposto, comprovou-se a eficácia da técnica de análise polarimétrica associada ao Efeito Faraday para determinar a corrente elétrica em uma linha de distribuição / transmissão de energia elétrica.

5.2. Perspectiva de trabalhos futuros

Como perspectivas para trabalhos futuros, apresentamos as seguintes propostas:

1. Desenvolver sensor de tensão e integrar ao de corrente para análise de potência e outras grandezas.
2. Aperfeiçoar os projetos mecânicos com base na experiência e nos resultados já obtidos.
3. Utilizar cristais com maior constante de Verdet e estudar as respostas obtidas.
4. Desenvolver o cabeça de série, transformando o sensor em uma versão comercial.
5. Utilizar rede de sensores para comunicação remota do sensor fixo.

Bibliografia

BALANIS, Constantine A. **Advanced engineering electromagnetics**. John Wiley & Sons, 2012.

BARNES, Norman P.; PETWAY, Larry B. Variation of the Verdet constant with temperature of terbium gallium garnet. **JOSA B**, v. 9, n. 10, p. 1912-1915, 1992.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering**. NY: John Wiley & Sons, 2011.

DE NAZARÉ, Fábio Vieira Batista; WERNECK, Marcelo Martins. Compact optomagnetic Bragg-grating-based current sensor for transmission lines. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 1, p. 100-109, 2015.

FOWLES, Grant R. **Introduction to modern optics**. Courier Corporation, 1975.

GALLIANA, Flavio; CAPRA, Pier Paolo. Traceable technique to calibrate clamp meters in AC current from 100 to 1500 A. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 61, n. 9, p. 2512-2518, 2012.

JACKSON, J. David. **Electrodynamics**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1975.

KAPLAN, Ben-Zion; BORODA, Vladimir; SUISSA, Uri. Low-cost DC electric field sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 134, n. 2, p. 396-398, 2007.

KEISER, Gerd. **Comunicações por Fibras Ópticas**. AMGH Editora, 2014.

MAJEED, Hassaan; SHAHEEN, Amrozia; ANWAR, Muhammad Sabieh. Complete Stokes polarimetry of magneto-optical Faraday effect in a terbium gallium garnet crystal at cryogenic temperatures. **Optics express**, v. 21, n. 21, p. 25148-25158, 2013.

REILLY, Deborah et al. A fiber-Bragg-grating-based sensor for simultaneous AC current and temperature measurement. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 6, p. 1539-1542, 2006.

ROGERS, A. J. Method for simultaneous measurement of current and voltage on high-voltage lines using optical techniques. In: **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**. IET, 1976. p. 957-960.

SATPATHI, Debashis; MOORE, Jeffrey A.; ENNIS, Michael G. Design of a Terfenol-D based fiber-optic current transducer. **IEEE Sensors Journal**, v. 5, n. 5, p. 1057-1065, 2005.

SILVA, Ricardo M. et al. Optical current sensors for high power systems: a review. **Applied sciences**, v. 2, n. 3, p. 602-628, 2012.

UDD, Eric; SPILLMAN JR, William B. (Ed.). **Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists**. John Wiley & Sons, 2011.

WERNECK, Marcelo Martins; ABRANTES, Antonio Carlos Souza. Fiber-optic-based current and voltage measuring system for high-voltage distribution lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 3, p. 947-951, 2004.

CHEN, Zhe et al. Improving characteristic of Faraday effect based on the Tm 3+ doped terbium gallium garnet single crystal. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 661, p. 62-65, 2016.

ANEXO A – Publicações Científicas

A.1 Publicações Científicas relacionadas à dissertação:

Eventos:

1. Moura, L. P.; Medeiros, G. M.; Oliveira, W. F.; Miranda, J. I. S.; Pinto, P. Victor F.; Guimarães, G. F. Protótipo de equipamento óptico para medição da corrente elétrica de uma linha de distribuição in loco utilizando Efeito Faraday. XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2016.

Patente:

1. GUIMARAES, G. F.; MOURA, L. P.; MEDEIROS, G. M.; OLIVEIRA, W. F. ; MIRANDA, J. I. S. ; PINTO, P. V. F. ; ROCHA, D. S. ; MENEZES, J. W. M. ; ALEXANDRIA, A. R. ; DIOGENES FILHO, R. G. ; ARAUJO, A. L. C. ; BASTOS, A. M. ; SILVA, J. F. M. C. Aperfeiçoamento Introduzido em Sensor Óptico de Corrente Alternada em linhas de Baixa e Alta Tensão. 2016, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020160032458, data de depósito: 17/02/2016, título: "Aperfeiçoamento Introduzido em Sensor Óptico de Corrente Alternada em linhas de Baixa e Alta Tensão", Instituição de registro: INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

Artigo Submetido:

Dois artigos estão em processo de submissão.

A.2. Publicações não relacionadas à Dissertação:

Artigos publicados em revistas

1. Correia, D. G.; ÁVILA, Kilvia M. V.; Cavalcante, D. N. S.; Pinto, P. Victor F; Magalhães, F. T. C. B.; Moura, L. P.; Ferreira, A. C.; Menezes, J. W. M.; Guimarães, G. F. Non-linear switching based on dual-core non-linear optical fiber couplers with xpm and raman intrapulse applied to femtosecond pulse propagation. Journal of Modern Optics, Taylor & Francis, p. 1-7, 2015.

2. Correia, D. G.; Sales, J. C.; Pinto, P. V. F.; Moura, L. P.; Ferreira, A. C.; Menezes, J. W. M.; Guimarães, G. F.; Sombra, A. S. B. Analysis of the performance of a pam/ppm/ook system operating with ocdma, under nonlinear optical effects in optical fiber propagation. Journal of Optical Communications.

Timbó, Á. P.; Pinto, P. Victor F.; Pinho, H. A.; Moura, L. P.; Chretien, J. B.; Viana, F. W.; Filho, R. G. D.; da Silva, E. B.; da Silva, M. E. R.; Menezes, J. W. M. et al. ph optical sensor based on thin films of solgel with bromocresol purple. Sensors and Actuators B: Chemical, Elsevier, v. 223, p. 406-410, 2016.

Eventos:

1. Pinto, P. Victor F; Guimaraes, G. F.; Jacinto, J. M.; Moura, L. P. Efeito Self-Steepening em Redes de Bragg. 2014. (Apresentação de Trabalho/- Simpósio).
2. Magalhaes, F. T. C. B.; Correia, D. G.; Pinto, P. Victor F.; Moura, L. P.; Guimaraes, G. F.; Menezes, J. W. M.; Fraga, W. B.. Unbalance of Sagnac Interferometer by using Raman Scattering. In: XXXVIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2015, Foz do Iguaçu - Paraná. Anais de Evento do XXXVIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2015.
3. Magalhaes, F. T. C. B.; Pinto, P. Victor F.; Moura, L. P.; Guimaraes, G. F.; Fraga, W. B. ESTUDO NUMERICO E ANALITICO DO INTERFEROMETRO OPTICO SAGNAC SOB EFEITOS DE NAO LINEARIDADES. In: IX Encontro de Pós-Graduação e Pesquisa, 2014, Sobral-Ce. Anais do IX Encontro de Pós-Graduação e Pesquisa, 2014.

Patente:

1. PINTO, P. VICTOR F.; MOURA, L. P.; CHRETIEN, J. B.; FRAGA, W. B.; DIOGENES FILHO, R. G.; TIMBO, A. P.; SILVA, E. B.; GUIMARAES, G. F.; PINHO, H. A.; VIANA, FLAVIO WANDERLEY; OLIVEIRA, W. F.; MENEZES, J. W. M.; SILVA, M. E. R. APERFEIÇOAMENTO INTRODUIDO EM SENSOR ÓPTICO DE PH. 2015, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020150275056, data de depósito: 29/10/2015, título: "APERFEIÇOAMENTO INTRODUIDO EM SENSOR ÓPTICO DE PH", Instituição de registro: INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial.