

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 04/08/2020.

FLÁVIO HENRIQUE FERNANDES TOBAL

**Método de Detecção de Fase Óptica Aplicado a Calibração de
Sensor de Tensão Polarimétrico**

FLÁVIO HENRIQUE FERNANDES TOBAL

Método de Detecção de Fase Óptica Aplicado a Calibração de Sensor de Tensão Polarimétrico

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP - Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Ilha Solteira, SP.

Co-Orientador: Prof. Dr. José H. Galeti
Instituto Federal de Mato Grosso do Sul
Três Lagoas, MS.

Ilha Solteira
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T551m Tobal, Flávio Henrique Fernandes.
Método de detecção de fase óptica aplicado a calibração de sensor de
tensão polarimétrico / Flávio Henrique Fernandes Tobal. -- Ilha Solteira: [s.n.],
2020
103 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

Orientador: Cláudio Kitano
Coorientador: José H. Galeti
Inclui bibliografia

1. Optoeletrônica. 2. Célula Pockels. 3. Efeito Pockels. 4. Sensor de alta
tensão. 5. Instrumentação. 6. Medição.


Rajane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

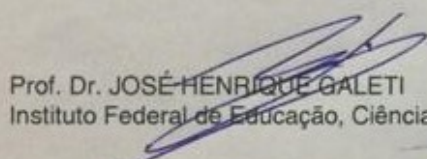
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Método de Detecção de Fase Óptica Aplicado a Calibração de Sensor de Tensão Polarimétrico

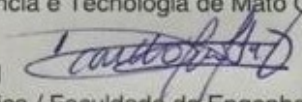
AUTOR: FLÁVIO HENRIQUE FERNANDES TOBAL

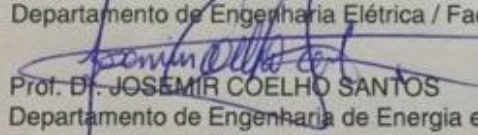
ORIENTADOR: CLAUDIO KITANO

COORIENTADOR: JOSÉ HENRIQUE GALETI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ HENRIQUE GALETI
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul - IFMS


Prof. Dr. RICARDO TOKIO HIGUTI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. JOSEMIR COELHO SANTOS
Departamento de Engenharia de Energia e Automação / Universidade de São Paulo - USP

Ilha Solteira, 04 de fevereiro de 2020

Dedico este trabalho a Deus, autor desta obra, por ser minha âncora, meu guia, minha luz, minha esperança, minha coragem, minha força e a maior representação da minha fé; a minha esposa Aline, que me apoiou e suportou nos momentos de aflição e fraqueza, e nos momentos de glórias e vitórias; Aos meus filhos Helena e Arthur, por seus amores incondicionais, suas alegrias e seus espíritos de vida e paz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida maravilhosa que me é dada, e a Jesus Cristo pelos exemplos e ensinamentos e por renovar a minha fé a cada dia, me mantendo firme nos meus propósitos.

A minha amada esposa Aline e meus amados filhos: Helena e Arthur, por serem a razão do meu viver, do meu buscar, de me superar como ser humano, como pai e como amigo. Por todo o amor que dividimos que é essência do meu viver. E por me darem o suporte emocional que preciso para vencer neste mundo.

A meus pais Osmar e Márcia, pelo amor e carinho, pela educação impecável que me proporcionaram e que me permitiu chegar até aqui, e por serem exemplos de dedicação e sucesso.

Aos meus sogros Lineu e Célia, por me acolherem como filho me dando amor, carinho, suporte emocional e espiritual que me fortalecem. Por todos os bons conselhos que me fazem amadurecer e trilhar o meu caminho de paz e retidão.

As minhas irmãs Ana Paula e Ana Elisa por todo o companheirismo que nos moldou no que somos hoje, pelas brincadeiras e pelas brigas que nos trouxeram mais amor e compreensão. Pelos meus sobrinhos Carlos Augusto e Eduardo, porque aumentam o meu amor.

Aos meus cunhados e irmãos Lineu Júnior, Cristiane, Márcio e Carlos por me receberem como um irmão. Por todos os bons momentos, aprendizados e guloseimas que dividimos.

Agradeço a meu orientador Professor Doutor Cláudio Kitano, pelo voto de confiança e pela impecável orientação e suporte neste Mestrado. A meu co-orientador Professor Doutor José Henrique Galeti, por todo o ensinamento e troca de conhecimentos, pela orientação e comando neste trabalho.

Aos amigos de laboratório: Guilherme, Luiz Henrique, Stephany, João Paulo, Ángel, Andryos e Anderson pela troca de conhecimentos, orientações, descontrações e por todo cafezinho que compartilhamos.

Ao Everaldo L. Moraes, técnico que nos auxilia e viabiliza os experimentos e pelos bons momentos compartilhados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Um pouco de ciência nos afasta de Deus.”

Muita ciência nos aproxima Dele.

Louis Parteur (1822 - 1895)

RESUMO

Atualmente, a técnica óptica de maior sucesso desenvolvida para medição de altas tensões em linhas elétricas de potência com frequências de 50/60 Hz, utiliza célula Pockels de niobato de lítio volumétrica, constituindo o chamado OVS - sensor óptico de tensão (do inglês: *Optical Voltage Sensor*). Mas, ao contrário da área de vibrometria onde existem padrões ISO baseados em métodos interferométricos simples e confiáveis para calibração de sensores, ainda não há procedimento padronizado para medição de V_{π} (tensão de meia onda) da célula Pockels ou para calibração de OVSS. Como os OVSS baseados em células Pockels podem ser considerados como interferômetros polarimétricos, e inspirados pela norma ISO 16063-41 (para calibração de transdutores de vibração e choque), especificamente a técnica chamada SCM - método do sinal coincidente (do inglês: *Signal Coincidence Method*), este trabalho apresenta um novo método para detecção de fase óptica digital e processado em tempo real sob medida para medição de V_{π} em OVSS. A fim de demonstrar a eficácia da nova técnica, medições foram executadas aplicando-se um sinal de tensão ao OVS, composto pela superposição de uma tensão senoidal de 60 Hz, com amplitude igual ao valor de referência de V_{π} (4,07 kV neste caso) e uma tensão DC alta o suficiente para fornecer um retardo de fase *bias* estática de 90° , como especificado pelo SCM, comprovando que o método pode recuperar o valor de V_{π} de acordo com o valor estimado. Entretanto, é sabido que o ajuste da fase *bias* em um interferômetro polarimétrico pode sofrer variações indesejadas de tempos em tempos, devido a desvios na temperatura ambiente e outros distúrbios externos, levando o OVS a um ponto fora do ponto de operação ideal e não atendendo ao padrão ISO. Como uma vantagem, experimentos demonstraram que o novo método é tolerante a variações na fase *bias* estática de 90° (variando de 60° a 120°), bem como a variações na amplitude de tensão aplicada ao OVS, variando de $\pm 25\%$ em relação a tensão de referência 4,07 kV. Valores de V_{π} foram detectados com precisão, com erro percentual máximo de 0,15% e, portanto, satisfazendo a especificação do padrão ISO 16063.

Palavras-chave: Optoeletrônica. Célula Pockels. Efeito Pockels. Sensor de alta tensão. Instrumentação. Medição. Interferometria. Metrologia. Medição de fase.

ABSTRACT

Nowadays, the most successful optical technique developed for measuring high voltages in 50/60 Hz electric power lines utilizes the bulk lithium niobate Pockels cell, constituting the so-called OVS - Optical Voltage Sensor. But, unlike the area of vibrometry where there are ISO standards based on reliable and simple interferometric methods for calibrating the sensors, there is still no standardized procedure for measuring V_{π} (half-wave voltage) of Pockels cells or for calibrating OVSs. As the Pockels cell-based OVSs can be considered as a polarimetric interferometer, and inspired by the ISO 16063-41 standard (for the calibration of vibration and shock transducers), specifically the technique called SCM – Signal Coincidence Method, this work presents a new digital and real-time method for optical phase detection tailored for the measurement of V_{π} in OVSs. Measurements were made in order to demonstrate the effectiveness of the new technique by applying a voltage signal to the OVS, composed by the superposition of a 60 Hz sinusoidal voltage, with amplitude equal to the reference value of V_{π} (4.07 kV in this case) and a DC voltage high enough to provide a 90° bias static phase shift, as specified by SCM, proving that the method can recover the value of V_{π} in accordance with the estimated value. However, it is well known that the adjustment of the bias phase in a polarimetric interferometer can undergo undesired variations from time to time, due to drifts in ambient temperature and other external disturbances, taking the OVS out of its optimal operating point and not attending the ISO standard. As an advantage, experiments have shown that the new method is tolerant to variations in the 90° bias static phase (ranging from 60° to 120°), as well as to variations in the amplitude of the voltage applied to the OVS, varying $\pm 25\%$ in relation to the 4.07 kV reference voltage. The V_{π} values were accurately detected, with a maximum percentage error of 0.15% and, therefore, satisfying the specification of the ISO 16063 standard.

Index Terms: Optoelectronics. Pockels cell. Pockels effect. High-voltage sensor. Instrumentation. Measurement. Interferometry. Metrology. Phase measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação esquemático do elipsoide de índices de refração.	25
Figura 2	Célula Pockels longitudinal.	29
Figura 3	Célula Pockels transversal.	29
Figura 4	Rotação de eixos em torno do eixo cristalino X_1	30
Figura 5	Esquema do sensor eletro-óptico de amplitude com campo elétrico externo aplicado em Y e propagação óptica em Z	33
Figura 6	Foto detecção de sinal óptico com principais fontes de ruído envolvidos.	37
Figura 7	Representação esquemática do interferômetro de Michelson.	39
Figura 8	(a) Curva interferométrica. (b) Sinal interferométrico normalizado de vibrômetros com destaque para os pontos de coincidência. (c) Sinal aplicado ao interferômetro.	40
Figura 9	Resultado da aplicação do SCM ao sensor polarimétrico com aplicação de valores de pico para $V(t)$ igual a V_π e ϕ_o igual a $\pi/2$ radianos.	41
Figura 10	Sinais simulados de um sensor polarimétrico para valores de pico de $\phi(t)$ iguais a π radianos (coincidência), cinco valores de ϕ_o e dois períodos de aquisição.	42
Figura 11	Efeito das variações de amplitude de $\phi(t)$ no gráfico do sinal interferométrico. Sequência de desvios de amplitude normalizada de -20% a $+20\%$ (de cima para baixo no gráfico).	43
Figura 12	Fluxograma do método de detecção de fase óptica.	44
Figura 13	Representação dos sinais $v_1(t)$ e $ v_2(t) $ com aplicação de $\phi(t)$ senoidal com valor de pico igual a π rad e $\phi_o = \pi/2$ rad.	47
Figura 14	Plano x-y obtido dos sinais $v_1(t)$ e $ v_2(t) $ representando a fase polar do sinal $y(t)$	48
Figura 15	Representação do sinal $\xi(t)$ para $y(t) = v_2(t) + jv_1(t)$	49
Figura 16	Sinal $\xi(t)$ com destaque para a imperfeição na amplitude do sinal.	51

Figura 17	Diagrama de blocos do algoritmo de detecção de picos do sinal $\xi(t)$ normalizado.	52
Figura 18	Sinais representativos da manipulação algébrica da derivada primeira de $\xi(t)$. (a) Cálculo de $\xi'(t)$. (b) Cálculo de $M1 = \xi'(t)\xi'(t - d\tau)$. (c) Cálculo de $sgn[M1]$. (d) Cálculo de $-sgn[M1] + 1$	53
Figura 19	Representações do sinal $\xi''(t)$, derivada segunda de $\xi(t)$. (a) Valores de $\xi''(t)$ nos máximos e mínimos absolutos, (b) Cálculo de $\xi''(t)$ nos demais instantes.	54
Figura 20	Representação do módulo dos picos do sinal $\xi(t)$ obtidos pela multiplicação $ \xi''(t) \times (-sgn[M1] + 1)$	55
Figura 21	Representação dos picos positivos e negativos do sinal $\xi(t)$ obtidos por: $sgn[\xi(t)] \times \xi''(t) \times (-sgn[M1] + 1)$	56
Figura 22	Representações da manipulação do sinal $\xi(t)$ na detecção de picos, etapa 2. (a) Cálculo de $ \xi(t) - 0,95$. (b) Cálculo de $sgn[\xi(t) - 0,95]$. (c) Cálculo de $sgn[\xi(t) - 0,95] + 1$	57
Figura 23	Picos identificados do sinal $\xi(t)$, eliminados os picos das reentrâncias.	58
Figura 24	Diagrama de blocos do algoritmo de correção do sinal $\xi(t)$	59
Figura 25	Sinal $\theta(t)$ obtido pelo método de detecção de fase óptica aplicado ao sinal interferométrico simulado.	60
Figura 26	Caixa térmica desenvolvida no LOE para análise do sensor de tensão polarimétrico detalhe para o compressor de resfriamento (1), câmara fria (2), câmara térmica (3), termômetro (4) e células Peltier (5).	63
Figura 27	Câmara térmica da caixa térmica desenvolvida no LOE detalhe para ventiladores de resfriamento (6), ventilador e aquecimento (7) e termômetro (8).	63
Figura 28	Diagrama de blocos com descrição de circuitos e componentes da caixa térmica.	64
Figura 29	Diagrama de blocos ilustrando o funcionamento da rotina de controle da caixa térmica.	65
Figura 30	Gráfico Tensão [V] x Temperatura [$^{\circ}$ C] para calibração do RTD PT-100.	69
Figura 31	Plataforma E/S reconfigurável National Instruments TM myRIO-1900.	70
Figura 32	Diagrama de blocos plataforma NI myRIO - 1900.	71
Figura 33	Plataforma DAQ NI PCIe - 6361.	72

Figura 34	Painel para montagem em <i>rack</i> NI BNC - 2090A.	73
Figura 35	Esquema do sensor de tensão polarimétrico proposto.	74
Figura 36	Célula Pockels denominada Sensor de Alta Tensão (SAT).	75
Figura 37	Montagem experimental do sensor de tensão polarimétrico no interior do aparato térmico.	76
Figura 38	Esquema do sensor de tensão polarimétrico com a eletrônica utilizada.	77
Figura 39	Padrão de interferência experimental do cristal de $LiNbO_3$ devido ao espalhamento de luz.	79
Figura 40	Sinal interferométrico de referência obtido pelo método de detecção de fase óptica para ajuste inicial do sensor de tensão polarimétrico.	80
Figura 41	Relação entre a tensão de meia onda do cristal $LiNbO_3$, V_π , e a temperatura em $^{\circ}C$ (a); erros absolutos com relação ao valor de referência (b); erros relativos com relação ao valor de referência (c).	81
Figura 42	Relação entre V_π e a temperatura em $^{\circ}C$ para a curva de resfriamento com a reta de tendência obtida pelo método dos mínimos quadrados (a); Relação entre V_π e a temperatura em $^{\circ}C$ para a curva de aquecimento com a reta de tendência obtida pelo método dos mínimos quadrados.	82
Figura 43	Sinal interferométrico de referência obtido em osciloscópio para calibração de sensor de tensão polarimétrico.	84
Figura 44	Sinais experimentais de um sensor polarimétrico para $\phi(t) = \pi$ radianos (coincidência), para valores de ϕ_o entre 60° e 120° e dois períodos de aquisição.	86
Figura 45	Relação $V_\pi \times \phi_o$ obtida pela aplicação do método de detecção de fase óptica ao sensor de tensão polarimétrico.	89
Figura 46	Sinais experimentais de um sensor de tensão polarimétrico obtidos pela variação da amplitude da tensão aplicada $V(t)$ em uma faixa de -25% e $+25\%$ de V_p	91
Figura 47	Relação $V_\pi \times V_p$ obtida pela aplicação do método de detecção de fase óptica ao sensor de tensão polarimétrico com variação da amplitude de $V(t)$	94
Figura 48	Representação dos sinais $V_s(t)$, aplicado ao OVS, e $V_r(t)$, recuperado pelo método de detecção de fase óptica com V_π obtida pelo processo de calibração.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Especificação para termorresistências em platina Ômega.	66
Tabela 2	Especificação da termorresistências em platina Isotech.	67
Tabela 3	Dados coletados para calibração do termômetro RTD PR-100 com uso do termômetro MilliK.	68
Tabela 4	Valores de V_{DC} aplicados ao sensor polarimétrico para variação de ϕ_o e valores de amplitude de pico de $V(t)$, V_p , medidos no processo.	85
Tabela 5	Valores de amplitude de pico do retardo de fase óptica induzido, $\phi(t)$, Φ_p , e de fase quase estática ajustada ϕ_o , obtidos pelo algoritmo de detecção de fase óptica.	87
Tabela 6	Valores calculados de V_π radianos, desvios padrões de amostragem e erro percentual com relação ao valor de referência $\phi_o = \pi/2$ radianos.	88
Tabela 7	Valores de amplitude de $V(t)$, V_p aplicados ao sensor polarimétrico e V_{DC} medidos no processo.	90
Tabela 8	Valores de amplitude de $\phi(t)$, Φ_p , e de ϕ_o medidos pelo algoritmo de detecção de fase óptica.	92
Tabela 9	Valores calculados de V_π kV, desvios padrões de amostragem e erro percentual com relação ao valor de referência.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	conversor Analógico Digital
APD	Fotodiodo de avalanche (do inglês: <i>Avalanche Photodiode</i>)
AT	Amplificador de Transimpedância
BGO	Germanato de Bismuto (do inglês: <i>Bismuth Germanate</i>)
EOE	Efeito elétrico óptico (do inglês: <i>Electro-Optic Effect</i>)
FCM	Método de contagem de franjas (do inglês: <i>Fringe-Counting Method</i>)
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
GPIO	Barramento de interface de propósito geral (do inglês <i>General-Purpose Interface Bus</i>)
LOE	Laboratório de ÓptoEletrônica
LN	Niobato de Lítio (do inglês: <i>Litium Niobate</i>)
MPM	Método de desaparecimento de franjas (do inglês: <i>Minimum-Point Method</i>)
OVS	Sensor óptico de tensão (do inglês: <i>Optical Voltage Sensor</i>)
PIN	Fotodiodo de junção p-i-n (do inglês: <i>Positive-Intrinsic-Negative photodiode</i>)
PM	Modulação em Fase (do inglês: <i>Phase Modulation</i>)
SCM	Método do sinal coincidente (do inglês: <i>Signal Coincidence Method</i>)
THD	Distorção harmônica total (do inglês: <i>Total Harmonical Distortion</i>)
TP	Transformador de Potencial
TPI	Transformador de Potencial Indutivo
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
USB	Barramento serial universal (do inglês <i>Universal Serial Bus</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Dado em <i>Volts</i> , é um fator que depende do ganho do fotodetector, da potência do <i>laser</i> , das perdas de intensidade óptica do feixe de <i>laser</i> , entre outros
α	Desalinhamento angular no plano XY
$BaTiO_3$	Titanato de Bário
$Bi_4Ge_3O_{12}$	Germanato de Bismuto
CdS	Sulfeto de Cádmio
\vec{D}	Vetor deslocamento elétrico
d	Distância entre os eletrodos da célula Pockels
$\Delta\phi_o$	Perturbações externas expúrias
$\Delta\Gamma$	Retardo de fase total
$\Delta\eta_{ij}$	Variação do tensor impermeabilidade dielétrica relativa
$d\tau$	Período de amostragem
\vec{E}	Vetor campo elétrico aplicado ao cristal
E_1, E_2 e E_3	Campo elétrico aplicado nas direções dos eixos cristalinos X, Y e Z
ϵ	Tensor dielétrico absoluto
ϵ_0	Permissividade absoluta no vácuo — $1/36 \times \pi \times 10^{-9}$ [F/m]
ϵ_r	Matriz permissividade relativa
f_o	Frequência do sinal de tensão aplicado ao OVS
ϕ_o	Fase quase estática devido a birrefringência
f_s	Frequência de amostragem
$\phi(t)$	Retardo eletro-óptico
η	Impermeabilidade dielétrica
η_{ij}	Tensor impermeabilidade dielétrica relativa
$\eta_{ij}(0)_{x_i x_j}$	Elipsóide de índices não perturbado
$\eta_{ij}(\vec{E})_{x_i x_j}$	Elipsóide de índices perturbado pelo campo elétrico \vec{E}
I_o	Intensidade óptica do <i>laser</i> na saída do analisador
$i(t)$	Corrente elétrica do obtida da conversão do sinal de $I(t)$ pelo fotodetector
$I(t)$	Sinal de intensidade óptica de saída do OVS
K	Número total de ciclos do sinal $\xi(t)$
$K^{(1)}$	Vetor de onda do modo ordinário
$K^{(2)}$	Vetor de onda do modo extraordinário
KH_2PO_4	Fosfato de Di-Hidrogênio Potássio
$\xi(t)$	Fase angular do número complexo $y(t), \angle y(t)$

$\xi'(t)$	Derivada primeira do sinal $\xi(t)$
$\xi''(t)$	Derivada segunda do sinal $\xi(t)$
L	Comprimento do cristal na direção de propagação do campo óptico
λ	Comprimento de onda
LiNbO_3	Niobato de Lítio
LiTaO_3	Tantalato de Lítio
$M1$	Multiplicação de $\xi(t)$ e $\xi(t - d\tau)$
N	Número total de pontos do sinal $v(t)$
n_e	Índice de refração extraordinário do cristal
$(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$	Fosfato de Di-Hidrogênio Amônia
n_o	Índice de refração ordinário do cristal
n_x, n_y e n_z	Índices de refração medidos nas direções X, Y e Z do elipsóide
p_0 a p_9	Posição dos picos do sinal $\xi(t)$ identificados no método proposto
\vec{r}	Raio vetor do elipsóide de índices
r_{ijk}	Coefficiente eletro-óptico linear ou coeficiente Pockels
$\text{sgn}[]$	Função sinal algébrico
s_{ijkl}	Coefficiente eletro-óptico quadrático ou coeficiente de Kerr
τ	Período do sinal interferométrico
$\theta(t)$	Retardo de fase induzido considerando as perturbações expúrias
V	Visibilidade das franjas de interferência
V_{DC}	<i>Offset</i> de tensão DC adicionado ao sinal de tensão $V_s(t)$
$v(t)$	Sinal interferométrico fotodetectado
$v_1(t)$	Sinal interferométrico normalizado
$v_2(t)$	Sinal interferométrico em quadratura
V_p	Amplitude de pico do sinal de tensão aplicado ao OVS
V_π	Tensão de meia onda da célula Pockels
$V_s(t)$	Sinal de tensão aplicado ao cristal
X, Y e Z	Direções cristalográficas do cristal de Niobato de Lítio
X_1, X_2 e X_3	Notação para os eixos principais do cristal nas direções dos eixos cristalinos X, Y e Z
X'_1, X'_2 e X'_3	Novos eixos cristalográficos após rotação angular dos eixos
x_i e x_j	Coordenadas dos eixos cristalinos principais
$ y(t) \angle y(t)$	Número complexo na forma polar
$y(t)$	Número complexo obtido pela transformação polar dos números $v_1(t)$ e $ v_2(t) $
$y_1(t)$	Número complexo obtido pela transformação polar dos números $v_1(t)$ e $v_2(t)$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA PARA O TRABALHO	21
1.2	OBJETIVO	22
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	22
2	EFEITO ELETRO-ÓPTICO	23
2.1	CÉLULA POCKELS	28
2.1.1	Célula Pockels Longitudinal	28
2.1.2	Célula Pockels Transversal	29
2.2	INTERFERÔMETRO POLARIMÉTRICO	32
2.2.1	Fotodeteccção do Sinal Interferométrico	36
3	MÉTODO DE DETECÇÃO DE FASE ÓPTICA	38
3.1	Método do Sinal Coincidente (SCM)	39
3.2	Método Proposto	43
3.2.1	Detecção dos ciclos do sinal	49
3.2.2	Normalização do sinal ciclo a ciclo	50
3.2.3	Detecção de picos do sinal	51
3.2.4	Correção do sinal	58
4	APARATO EXPERIMENTAL	62
4.1	CAIXA TÉRMICA	62
4.1.1	Calibração do Termômetro	66
4.2	PLATAFORMA NI myRIO-1900	70
4.3	PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PCIe - 6361	72

5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	74
5.1	SENSOR DE TENSÃO POLARIMÉTRICO (OVS)	74
5.1.1	Alinhamento do Sensor de Tensão Polarimétrico	78
5.2	SENSIBILIDADE DO CRISTAL DE LiNbO_3 À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	79
5.3	CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TENSÃO POLARIMÉTRICO	83
5.3.1	Relação entre tensão de meia onda e fase quase estática do sinal interferométrico	85
5.3.2	Relação entre tensão de meia onda e campo elétrico externo aplicado ao cristal	90
5.3.3	Aplicação e recuperação de sinal senoidal	95
6	CONCLUSÕES	97
6.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

A proliferação de cargas não-lineares conectadas ao sistema elétrico de potência desencadeou uma preocupação crescente com a qualidade de energia, em especial quanto à poluição harmônica. Uma das principais exigências atuais nas medições de média e alta tensões é o desenvolvimento de sensores de tensão e corrente com capacidade de monitoramento, medição, análise e proteção em tempo real. Além disso, estes medidores são fundamentais para o faturamento da demanda e consumo de energia elétrica. Em particular, as modernas concepções de *smart grids* demandam sensores confiáveis ao longo das redes de distribuição, não somente para o monitoramento da qualidade de energia elétrica gerada por diferentes tecnologias (nuclear, termoelétrica, eólica, solar, hidroelétrica), mas também, como parte integrante dos sistemas de automação e controle da rede de geração, transmissão e distribuição de energia.

As amplitudes das correntes e tensões em um sistema elétrico de potência, geralmente encontram-se demasiadamente elevadas para que se realize a conexão de equipamentos de medição, controle ou de proteção diretamente a seus elementos. Além disso, essa forma de conexão seria potencialmente perigosa para os operadores das subestações de energia elétrica, pelo fato de que a única proteção é a isolação que o equipamento possui (CHEMIN NETTO, 2008). O desenvolvimento de transformadores para instrumentos foi uma forma encontrada para minimizar os riscos aos operadores desses sistemas, pois constituem uma forma segura e adequada de operação, com o objetivo de fornecer sinais de tensão e corrente que os equipamentos de controle e medição necessitam (PETCH; RUSHTON, 1981). Assim, foram desenvolvidos os Transformadores de Potencial (TP) para instrumentos, com características próprias, pois são dedicados a converter as altas tensões a valores reduzidos, adequados a serem ligados aos instrumentos de medição, de controle, etc.

Transformadores para instrumentos são construídos predominantemente com cobre, cerâmica e ferro, acarretando em equipamentos volumosos e pesados, além de conterem óleos isolantes, com risco de explosão em caso de curto-circuito, expondo operadores da subestação ao risco, bem como a destruição dos equipamentos existentes nas proximidades. Medições de tensões elétricas em potenciais elevados são, convencionalmente, feitas por meio de transformadores eletromagnéticos de acoplamento indutivo (TPI - Transformador de Potencial Indutivo) ou por divisores capacitivos de tensão (TPC) (RUBINI JUNIOR, 2016). Entretanto, estes transformadores convencionais possuem limitação na resposta em frequência, cuja largura de banda é da ordem de apenas 500 Hz, não permitindo que seja realizada uma avaliação rigorosa do conteúdo harmônico presente na rede elétrica.

Neste aspecto, esforços consideráveis em pesquisas têm sido dedicados aos sensores ópticos de tensão - OVS (do inglês, *Optical Voltage Sensor*), sendo investigados sensores baseados em diferentes princípios físicos e diferentes tecnologias: efeito piezoelétrico (ALLIL; WERNECK, 2011; RIBEIRO; WERNECK; SILVA-NETO, 2013; RIBEIRO; WERNECK, 2015; DANTE et al., 2016), efeito eletro-óptico em óptica integrada (RAHMATIAN et al., 2000; CHAVEZ et al., 2000), efeito eletro-óptico em óptica volumétrica (ALMEIDA; SANTOS, 2005; SANTOS; ALMEIDA; SILV, 2012), entre outros. Em geral, os OVS's baseiam-se em variações nas propriedades ópticas de certos materiais em função do campo elétrico.

O interesse neste trabalho está voltado para o efeito eletro-óptico em óptica volumétrica, particularmente para o modulador eletro-óptico de intensidade baseado no efeito eletro-óptico linear em cristais como o Niobato de Lítio ($LiNbO_3$) (GIALLORENZI et al., 1982). Seguindo esta linha de pesquisa, foram desenvolvidos sensores ópticos com características especiais que, em geral, utilizam o modulador eletro-óptico de intensidade constituído por um cristal eletro-óptico posicionado entre dois polarizadores cruzados e uma lâmina de quarto-de-onda para estabelecer o ponto de quadratura de fase (YARIV; YEH, 1984). Materiais eletro-ópticos como o $LiNbO_3$, têm sido aplicados regularmente em sistemas de alta tensão devido à elevada largura de banda, resposta rápida e baixa perda de transmissão óptica (SIMA et al., 2016).

O efeito eletro-óptico linear é um fenômeno óptico no qual os índices de refração de um meio cristalino exibem variações proporcionais à intensidade do campo elétrico externo aplicado ao cristal. Este fenômeno foi descrito inicialmente pelo físico alemão Friedrich Pockels recebendo, assim, o nome Efeito Pockels. Este efeito ocorre em cristais não centrossimétricos como o niobato de lítio ($LiNbO_3$). O campo elétrico externo provoca variações relativas nos índices de refração dos modos próprios do cristal. Entretanto, estas variações são relativamente pequenas, provocando alterações apenas nas terceira ou quarta casas decimais dessas grandezas. Contudo, mesmo que muito pequenas, tais variações são suficientes para se proceder à medição das tensões de interesse através da instrumentação eletrônica disponível atualmente. Entretanto, como a técnica polarimétrica é sensível a estímulos muito fracos e, na prática, ela padece do fenômeno de desvanecimento do sinal interferométrico, particularmente se os efeitos de birrefringência natural do cristal eletro-óptico estiverem presentes (YARIV; YEH, 1984).

Em operações de campo, o cristal eletro-óptico usado como elemento sensor em OVS interage não só com o campo elétrico a ser testado, mas também, com os campos de temperatura e de *stress* (tensão mecânica) (XIAO; XU; DONG, 2015). Além disso, o arranjo em óptica livre, com lentes, filtros polarizadores, lâminas de onda, etc., tornam os OVS's vulneráveis à variação de temperatura, emissão acústica externa e vibração mecânica, resultando em sistemas instáveis e de difícil alinhamento.

Por exemplo, derivas de temperatura induzem deslocamentos aleatórios de fase óptica que introduzem incertezas ao deslocamento de fase verdadeiro, o que conduz a flutuações no sinal

foto detectado. Por sua vez, os efeitos de vibração mecânica no sistema causam uma indesejável modulação da intensidade da luz e, portanto, constituem uma fonte de ruído. Essas vibrações podem ser produzidas por emissão acústica quando na operação de disjuntores, pelas condições ambientais ou pela interferência humana. Por conseguinte, o sinal detectado pode flutuar aleatoriamente no tempo em uma ampla faixa de magnitudes, devido aos agentes de perturbação. O grande desafio é conceber uma configuração inovadora de OVS capaz de satisfazer as normas de exatidão (BLOOMING; CARNOVALE, 2006; IEC 61869-3, 2011) vigentes diante da incidência de perturbações externas indesejáveis.

Associado a isso, novas técnicas de detecção de sinais interferométricos, homódinas e heteródinas, são estudadas a fim de melhorar a qualidade de processamento dos sinais foto detectados pelos sensores ópticos de tensão ou corrente, para obtenção de métodos cada vez mais rápidos, mais confiáveis e mais precisos.

1.1 JUSTIFICATIVA PARA O TRABALHO

A relação entre a intensidade óptica e o retardo de fase induzido pelo efeito Pockels no interferômetro polarimétrico é dada por uma função cosseno. Portanto, é não linear e periódica, o que pode induzir ambiguidade de resultados e dificultar a demodulação e recuperação do retardo de fase óptica. A tensão medida, também depende da tensão de meia onda da célula Pockels (V_{π}), a qual é determinada pelas dimensões do cristal, alinhamento óptico, índices de refração do cristal e mudanças nos índices de refração em resposta a estresse mecânico (KRUPYCH; SAVARYN; VLOKH, 2014; GARCIA et al., 2014; PEREIRA et al., 2018).

Devido à relação direta entre o retardo de fase óptica e o deslocamento mecânico, interferômetros e vibrômetros são considerados padrões primários de calibração para medição de deslocamentos mecânicos (ISO 16063-11, 1999; ISO 16063-15, 2006; ISO 16063-21, 2003; ISO 16063-41, 2011). O sensor de tensão polarimétrico depende da determinação da tensão de meia onda da célula Pockels, entretanto, este parâmetro não pode ser considerado primário para medições de tensão.

Poucos métodos de calibração são propostos na literatura para a medição de V_{π} . Este trabalho propõe um método de demodulação do sinal interferométrico de uma célula Pockels fotodetectado, aplicado na determinação automática de V_{π} , permitindo medições de altas tensões precisas com o sensor de tensão polarimétrico. Considerando f_s a frequência de amostragem do sinal fotodetectado e f_o a frequência do sinal de tensão aplicado à célula Pockels, este método permite a obtenção de $N = f_s/f_o$ medidas de V_{π} por ciclo do sinal fotodetectado, diferente de outros métodos já citados, onde é obtida uma medida de V_{π} por ciclo do sinal fotodetectado.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta Dissertação é propor um método de detecção de fase óptica, capaz de medir a fase quase estática (ϕ_o) decorrente das variações ambientais, e a fase $\phi(t)$ que é diretamente proporcional ao campo elétrico aplicado a célula Pockels, o qual aplicado ao sensor de tensão polarimétrico tem como principal função a calibração através do levantamento da tensão de meia onda do cristal, V_π . Além disso, o método é empregado no levantamento da sensibilidade da V_π do cristal de LiNbO_3 à variação de temperatura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho é dividido em seis capítulos incluindo esta Introdução. No Capítulo 2 são discutidos o efeito eletro-óptico, a célula Pockels e o sensor eletro-óptico de amplitudes.

No Capítulo 3, é apresentado o método de detecção de fase óptica que tem por base a metodologia do Método do Sinal Coincidente, originalmente aplicado a vibrômetros. Entretanto, o método propõe a medição de um sinal de fase angular extraída do sinal complexo resultante de sinais trigonométricos obtidos a partir do sinal fotodetectado.

Em seguida, no Capítulo 4, é apresentada a caixa térmica utilizada para estabilizar a temperatura do meio onde o cristal está inserido, não permitindo variações superiores a $0,2^\circ\text{C}$, viabilizando as medições da tensão de meia onda do cristal para calibração do sensor de tensão polarimétrico, de forma que a temperatura não afete o sinal interferométrico. Esta caixa é utilizada, também, no levantamento da sensibilidade de V_π à variações de temperatura do meio, estabilizando a temperatura em patamares pré-programados, variando em uma faixa de valores de -16°C a $+62^\circ\text{C}$. Também são apresentadas as plataformas embarcadas para aquisição e processamento de sinais.

O esquema do sensor eletro óptico de tensão polarimétrico e os resultados experimentais são então apresentados no Capítulo 5, onde são discutidos os dados obtidos da aplicação do método ao sensor eletro-óptico de amplitudes, bem como o levantamento da curva característica de tensão de meia onda da célula Pockels (V_π), a fase quase estática (ϕ_o), e o gráfico de V_π versus a amplitude de pico do sinal aplicado ao cristal (V_p). Ademais, apresenta-se o levantamento da sensibilidade de V_π à variações de temperatura.

Por fim, no Capítulo 6, são discutidas as conclusões para os testes executados e narradas as propostas para o trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método de detecção de fase óptica que, aplicado a sensor de tensão polarimétrico, auxilia na obtenção da tensão de meia onda do OVS, possibilitando a calibração do sensor para medição de tensão com exatidão e precisão. O método proposto tem como base a obtenção de fase angular de um sinal complexo, que é resultado de sinais trigonométricos obtidos de um único sinal fotodetectado. O método foi analisado através da aplicação em um sensor de tensão polarimétrico, o qual foi proposto em uma montagem simplificada com o uso de apenas uma célula Pockels, um polaroide polarizador, um polaroide analisador e um fotodetector. A proposta deste método se insere na linha de pesquisa do LOE para métodos de demodulação de fase homódinos (CARVALHO; FERREIRA; KITANO, 1999; BARBOSA, 2009; GALETI, 2012; LEMES, 2014).

Foram estudados: a propagação óptica através de cristais de Niobato de Lítio, a célula Pockels e moduladores de amplitude ou intensidade, também chamados de sensores ópticos de tensão. Para tanto, foi feita uma análise teórica do efeito eletro-óptico linear presente neste tipo de cristal, com ênfase na variação da intensidade do sinal devido a variações de temperatura do meio onde o cristal está inserido. Esta pesquisa é uma continuidade de trabalhos recentes apresentados no LOE de estudos de sensores ópticos de altas tensões (BARBOSA, 2009; GALETI, 2016; PEREIRA, 2018; PEREIRA et al., 2018).

A montagem do aparato experimental proporcionou bons resultados na aplicação do método para a calibração do sensor de tensão polarimétrico. Para viabilizar esta calibração, foi desenvolvida no LOE uma caixa térmica, capaz de estabilizar a temperatura interna com uso de controlador PID, de forma a permitir amostragens com baixa variação de temperatura, em torno de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que permitiu a aquisição dos sinais interferométricos sem interferência da temperatura nos resultados obtidos. Os resultados obtidos nesta aplicação demonstraram incertezas inferiores a $0,5\%$, como apresentado nas normas de calibração de vibrômetros (ISO 16063-11, 1999; ISO 16063-15, 2006; ISO 16063-21, 2003; ISO 16063-41, 2011).

Nos testes para calibração do OVS, no levantamento da relação entre a tensão de meia onda do cristal V_{π} e a fase quase estática ajustada ϕ_o , os erros obtidos foram inferiores a $0,25\%$, e a V_{π} média calculada foi de $4,063\text{ kV}$ com desvio padrão de $\pm 0,0019\text{ kV}$. A equação que relaciona $V_{\pi} \times \phi_o$ foi obtida e descrita na equação (52), apresentada no Capítulo 5 Subseção 5.3.1, com um fator relacional quadrático (R^2) igual a $0,9727$, demonstrando uma excelente relação entre V_{π} e ϕ_o .

Quanto ao levantamento da relação entre a tensão de meia onda do cristal V_{π} e a amplitude

da tensão de pico aplicada ao cristal V_{pico} , os erros obtidos foram inferiores a 0,15%, e a V_{π} média calculada foi de 4,066 kV com desvio padrão de $\pm 0,0021$ kV. A equação que relaciona $V_{\pi} \times V_{pico}$ foi obtida e descrita na equação (53), apresentada no Capítulo 5, Subseção 5.3.2, com um fator R^2 igual a 0,9161, demonstrando uma excelente relação entre V_{π} e V_{pico} .

Observe que, considerando a V_{π} média obtida pela variação da fase quase estática como referência, as tensões de meia onda obtidas nas duas aplicações apresentam um erro relativo entre elas de 0,075%.

Uma vez calibrado o OVS aplicou-se um sinal senoidal com ($V_s(t)$) com frequência de 60 Hz ao OVS e amplitude de pico de 4,072 kV. Aplicando-se o método digital proposto, obteve-se o sinal recuperado ($V_r(t)$), com amplitude de pico de 4,073 kV. O erro absoluto apresentado pelos sinais, quanto a amplitude destes, foi de 0,0057 kV e o erro relativo foi de 0,14%, inferior a 0,5% como previsto. Calculou-se também a distorção harmônica total (THD - do inglês: *Total Harmonical Distortion*), dos sinais $V_s(t)$ e $V_r(t)$ obtendo-se: $THD_s = 2,076\%$ e $THD_r = 2,068\%$, com um erro relativo de 0,008% entre os THD's.

A caixa térmica foi utilizada na análise da sensibilidade da tensão de meia onda do cristal à variações de temperatura. Neste etapa, a caixa foi configurada para operar em uma faixa de temperatura de -16 °C a 62 °C, estabilizando em patamares com 1 °C de variação. Observou-se que V_{π} do cristal demonstra variações devido a variações de temperatura. A tensão V_{π} média calculada foi de 4,024 kV. Tomando o valor médio como referência, as amostras obtidas apresentaram erros relativos inferiores a 3%, com média inferior a 2%, e erros absolutos de até 84 V entre as amostras. Desta forma, não foi possível obter uma relação matemática entre V_{π} e a variação de temperatura do cristal de LiNbO_3 . Entretanto, observa-se que, se aplicado este sensor para controle e proteção de linhas de altas tensão, este terá um comportamento satisfatório, uma vez que a norma vigente exige um grau de exatidão de 2% em média para esta aplicação. Porém, com os dados obtidos conclui-se que este sensor não pode ser aplicado a aferição, medição e faturamento financeiro de energia pois, a norma vigente exige um grau de exatidão de 0,3% para esta aplicação.

O uso das plataforma E/S myRIO e PCIe-6361, possibilitou a execução dos testes em tempo real, de uma maneira facilitada pela aplicação da linguagem de alto nível LabVIEW, além de simplificar a aquisição e o processamento de dados.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando continuar com às atividades realizadas nesta pesquisa e aperfeiçoar os resultados alcançados até o momento, propõem-se sugestões para os próximos trabalhos que podem conduzir a melhorias:

- Aprimoramento do método proposto para demodulação de sinais de alto índice de modulação: Esta atividade tem como objetivo habilitar o método para medição de tensões superiores às tensões aplicadas nas etapas aqui executadas, na ordem de 13,8 kV eficaz, bem como, tensões inferiores a 2 kV com baixo índice de modulação, tornando o método eficaz em qualquer amplitude de sinal aplicado ao sensor;
- Correção da caixa térmica: Esta sugestão tem como objetivo aprimorar o aparato experimental para alcance de temperaturas baixas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, e temperaturas altas $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, sem que vibrações mecânicas estejam presentes na caixa, não afetando assim a caracterização da V_{π} com a variação de temperatura;
- Caracterização da célula moduladora de fase óptica: Proposto por Pereira (2018), o objetivo desta etapa é levantar a característica do cristal, disposto nesta configuração, quanto à sensibilidade da tensão de meia onda, V_{π} , à variação de temperatura;
- Proposição de método de controle realimentado: Uma vez levantadas as curvas de sensibilidade das células Pockels Sensora de Alta Tensão (SAT) e Moduladora Óptica de Fase (MOF), (PEREIRA, 2018), desenvolver um método de controle por temperatura, usando uma célula Pockels auxiliar de modulação de fase óptica para correção dos erros de medição da célula Pockels sensora de altas tensões.
- A ponta de prova Tecktronix P6015A com atenuação de $1000\times$, utilizada na leitura da tensão de saída do transformador de alta tensão, apresenta incertezas de medição de 1%. Assim, com a finalidade de minimizar o erro gerado pela incerteza de medição da alta propõe-se, para trabalhos futuros, o uso de divisor de tensão resistivo, devidamente calibrado e aferido, com incertezas inferiores a 1%, ou o uso de transformador de potencial devidamente calibrado e aferido, com incertezas inferiores a 1% para a faixa de tensão aplicada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALLIL, R. C. da S. B.; WERNECK, M. M. Optical high-voltage sensor based on fiber bragg grating and PZT piezoelectric ceramics. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, New York, v. 60, n. 6, p. 2118–2125, jun. 2011.
- ALMEIDA, J. de; SANTOS, J. Coherent demodulation of the output signal of optical voltage transformer. *IEEE Latin America Transactions*, [S.I.], v. 3, n. 5, p. 47–52, dez. 2005.
- ANG, K. H.; CHONG, G.; LI, Y. PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, New York, v. 13, n. 4, p. 559–576, jul. 2005.
- ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T.; HANG, C.; HO, W. Automatic tuning and adaptation for PID controllers - a survey. *Control Engineering Practice*, Oxford, v. 1, n. 4, p. 699–714, ago. 1993.
- BARBOSA, F. de A. A. *Método de detecção interferométrica de fase, com baixa profundidade de modulação, aplicado à medição de deslocamentos nanométricos em atuadores e mini-manipuladores piezoelétricos*. 2009. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009.
- BLOOMING, T. M.; CARNOVALE, D. J. Application of IEEE STD 519-1992 harmonic limits. In: CONFERENCE RECORD OF 2006 ANNUAL PULP AND PAPER INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE. [S.I.], 2006. p. 1–9. ISSN 0190-2172.
- CARVALHO, A. A.; FERREIRA, W. B.; KITANO, C. Implementação de um sensor a fibra óptica polarimétrico para medidas de deformação de estruturas de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA. *Anais*. [...] Campinas: ABCM/UNICAMP. Águas de Lindoia, 1999. p. 1 – 10.
- CHAVEZ, P. P.; JAEGER, N. A.; RAHMATIAN, F.; YAKYMYSHYN, C. P. Integrated-optic voltage transducer for high-voltage applications. In: LESSARD, R. A.; LAMPROPOULOS, G. A. (Ed.). *Applications of Photonic Technology 4*. [S.I.]: SPIE, 2000.
- CHEMIN NETTO, U. *Aplicações de controle e supervisão distribuídas em subestações de energia elétrica através do uso de relés digitais de proteção*. 2008. 172 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- DANTE, A.; BACURAU, R. M.; SPENGLER, A. W.; FERREIRA, E. C.; DIAS, J. A. S. A temperature-independent interrogation technique for FBG sensors using monolithic multilayer piezoelectric actuators. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, New York, v. 65, n. 11, p. 2476–2484, nov. 2016.
- GALETI, J. H. *Medição interferométrica de fase óptica através do método de segmentação do sinal amostrado*. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade

- Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2012.
- GALETI, J. H. *Métodos de demodulação de fase aplicados a interferômetros de dois feixes realimentados*. 2016. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2016.
- GARCIA, M. R.; GALETI, J. H.; HIGUTI, R. T.; KITANO, C. A simple and efficient off-optical axis electro-optic voltage sensor. In: 2014 11TH IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS. [S.I.], 2014. p. 1–8.
- GIALLORENZI, T.; BUCARO, J.; DANDRIDGE, A.; SIGEL, G.; COLE, J.; RASHLEIGH, S.; PRIEST, R. Optical fiber sensor technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, New York, v. 30, n. 4, p. 472–511, 1982.
- IEC 61869-3. *Instrument transformers - part 3: additional requirements for inductive voltage transformers*. London, 2011. Table 1 - Temperature categories.
- ISO 16063-11. *Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry*. Geneva, 1999. Reviewed and confirmed in 2009.
- ISO 16063-15. *Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 15: Primary Angular Vibration Calibration by Laser Interferometry*. Geneva, 2006. Reviewed and confirmed in 2009.
- ISO 16063-21. *Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 21: Vibration Calibration by Comparison to a Reference Transducer*. Geneva, 2003. Reviewed and confirmed in 2008 with a Technical Corrigendum issued in 2009 (Cor.1:2009).
- ISO 16063-41. *Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 41: Calibration of Laser Vibrometers*. Geneva, 2011.
- ISOTECH. *Reference probes - semi standards platinum resistance thermometers*. 2019. Disponível em: <<https://www.isotech.co.uk/assets/uploads/Data%20Sheets-NEW%20Angled%20Semi%20Standards.pdf>>.
- KITANO, C. *Análise do interferômetro Mach-Zehnder com controle acústico-eletróptico*. 1993. 224 f. Tese (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) — Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1993.
- KRUPYCH, O.; SAVARYN, V.; VLOKH, R. Precise determination of full matrix of piezo-optic coefficients with a four-point bending technique: the example of lithium niobate crystals. *Applied Optics*, New York, v. 53, n. 10, p. 1–7, abr. 2014.
- LEMES, A. da S. *Novas configurações de interferômetros de quadratura e de técnicas de detecção de fase óptica baseadas em phase unwrapping*. 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2014.
- LUGÃO, J. R. L. *Controlador de temperatura para célula de medição de propriedades de líquidos por ultrassom*. 2015. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) —

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015.

LYRA, S.; MARTIN, R. I.; PEREIRA, F. C.; SILVA, E. C.; TEIXEIRA, M. C. M.; KITANO, C. Digital control system for two-beam optical interferometry using variable structure and sliding modes method. In: SADWICK, L. P.; YANG, T. (Ed.). *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII*. [S.l.]: SPIE, 2019.

MARÇAL, L. A. P. *Novas técnicas de detecção de fase óptica em interferômetros homódinos aplicados à caracterização de atuadores piezoelétricos flexionais*. 2008. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.

MARTIN, R. I. *Nonlinear control system based on variable structure and sliding modes for two beam optical interferometry*. 2018. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP, mar. 2018.

MARTINEZ, G. A. *Análise interferométrica da influência dos suportes de fixação de piezoatuadores ao breadboard: alteração da resposta em frequência para nanodeslocamentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP, set. 2018.

NASCIMENTO, A. R. Z.; POHL, A. d. A. P. *Estudo e caracterização de circuitos de transimpedância aplicados a sensores ópticos*. 2004 p. Dissertação (Mestrado em Informática Industrial) — Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, PR, 2004.

NATIONAL INSTRUMENTS™. *Device specification NI PCIe-6361*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.ni.com/pdf/manuals/374650c.pdf>>.

NATIONAL INSTRUMENTS™. *User guide and specifications NI myRIO-1900*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.ni.com/pdf/manuals/376047d.pdf>>.

NUNES, D. C.; PINTO, J. E. M. G.; FONSECA, D. G. V.; MAITELLI, A. L.; ARAÚJO, F. M. U. Relay based pid auto-tuning applied to a multivariable level control system. In: 2014 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATICS IN CONTROL, AUTOMATION AND ROBOTICS (ICINCO). [S.l.], 2014. v. 01, p. 741–748.

OMEGA. *Sensores RTD ultraprecisos para medição de ar e gás*. 2019. Disponível em: <https://br.omega.com/temperature/pdf/P-ULTRA_RTD.pdf>.

PEREIRA, F. da C. *Sensor óptico de alta tensão com chaveamento de quadratura e realimentado por controle de fase*. 2018. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2018.

PEREIRA, F. da C.; GALETI, J. H.; HIGUTI, R. T.; CONNELLY, M. J.; KITANO, C. Real-time polarimetric optical high-voltage sensor using phase-controlled demodulation. *Journal of Lightwave Technology*, New York, v. 36, n. 16, p. 3275–3283, ago. 2018.

PETCH, H. S.; RUSHTON, J. *Power System Protection – Principles and Components*. 2. ed.

UK: Peter Peregrinus, 1981.

RAHMATIAN, F.; ROMALO, D.; LEE, S.; FEKETE, A.; LIU, S.; F., J. N. A.; CHAVEZ, P. Optical voltage transducers for high-voltage applications. In: *Workshop on EPRI Optical Sensors Systems*. New York: [s.n.], 2000. p. 26 – 28.

RIBEIRO, B. A.; WERNECK, M. M. A mechanical method to tuning a FBG-PZT voltage sensor. In: KALINOWSKI, H. J.; FABRIS, J. L.; BOCK, W. J. (Ed.). *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*. [S.l.]: SPIE, 2015.

RIBEIRO, B. de A.; WERNECK, M. M.; SILVA-NETO, J. L. da. Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements. *IEEE Sensors Journal*, New York, v. 13, n. 4, p. 1259–1264, abr. 2013.

RUBINI JUNIOR, J. *Desenvolvimento de célula Pockels na topologia reflexiva aplicada a TP óptico de alta tensão*. 2016. 180 f. Tese (Doutorado em Sistemas de Potência) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2016.

SANTOS, J. C.; ALMEIDA, J. C. J.; SILV, L. P. C. White light sensing systems for high voltage measuring using electro-optical modulators as sensor and recover interferometers. In: *Fiber Optic Sensors*. [S.l.]: InTech, 2012.

SILVA, L. P. C. da. *Transformador óptico por interferometria de luz branca para medição de altas tensões*. 2005. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

SIMA, W.; LIU, T.; YANG, Q.; HAN, R.; SUN, S. Temperature characteristics of pockels electro-optic voltage sensor with double crystal compensation. *AIP Advances*, [S.I.], v. 6, n. 5, p. 055109, maio 2016.

SUDARSHANAM, V. S. Linear measurement of static phase change in optical homodyne interferometers: an analysis. *Optics Letters*, New York, v. 17, n. 9, p. 682, maio 1992.

Von MARTENS, H. Standardization of laser methods and techniques for vibration measurements and calibrations. *AIP Conference Proceedings*, New York, v. 1253, n. 1, p. 423–445, 2010.

Von MARTENS, H. Expanded and improved traceability of vibration measurements by laser interferometry. *Review of Scientific Instruments*, Rochester, NY, v. 84, n. 12, p. 121601, dez. 2013.

XIAO, X.; XU, Y.; DONG, Z. Thermodynamic modeling and analysis of an optical electric-field sensor. *Sensors*, [S.I.], v. 15, n. 4, p. 7125–7135, mar. 2015.

YARIV, A. *Optical electronics*. 3. ed. New York: Holt, Rinehart and Winstonm, 1985.

YARIV, A.; YEH, P. *Optical waves in crystals*. New York: John Wiley & Sons, 1984. p. 608.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, New York, v. 115, n. 2B, p. 220, 1993.