

## MEDIÇÃO DE CORRENTES ELÉCTRICAS COM UM SENSOR ÓPTICO INTERFEROMÉTRICO USANDO PROCESSAMENTO PSEUDO-HETERODINO.

P. A. S. Jorge<sup>a,b</sup>, P. Caldas<sup>a,b</sup>, L. A. Ferreira<sup>c</sup>, A. B. Lobo Ribeiro<sup>c</sup>, J. L. Santos<sup>b,a</sup> e F. Farahi<sup>d</sup>.

<sup>a</sup> INESC-Porto UOFE.

<sup>b</sup> Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto.

Rua do Campo Alegre, 687, 4169 007 Porto, Portugal. Tel.: +351 22 6082601, Fax: +35122 6082799.

<sup>c</sup> MultiWave Networks Portugal Lda., R. Eng. Frederico Ulrich 2650, 4470-605 Moreira da Maia, Portugal

<sup>d</sup> Physics Department, UNC Charlotte, Charlotte, NC 28223.

**Introdução:** A tecnologia óptica para medição de correntes eléctricas está em rápido progresso<sup>[1]</sup>. A natureza dieléctrica dos sensores ópticos reduz a necessidade de isolamento em alta-tensão. A maioria das configurações baseia-se no efeito de Faraday: uma birrefringência circular induzida no meio pela presença de um campo magnético  $\vec{H}$ , que se traduz, para polarização linear, numa rotação do plano de vibração por um ângulo  $\theta$  dado por:

$$\theta = V \int_L \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

onde  $V$  é a constante de Verdet e  $L$  o comprimento do meio. Na maioria das configurações em *bulk* a dependência de  $\theta$  com a corrente é convertida em modulação de potência óptica com um esquema polarimétrico. Mas estes esquemas são susceptíveis a flutuações de potência óptica. Apresenta-se uma configuração interferométrica em *bulk* onde a informação da medida aparece como uma modulação de fase dum portadora de alta frequência, independente das flutuações de potência óptica.

**Princípio de funcionamento:** O sistema proposto, na figura 1, consiste num interferómetro Mach-Zehnder acoplado a um interferómetro de Sagnac que descreve um quadrado em torno do condutor.

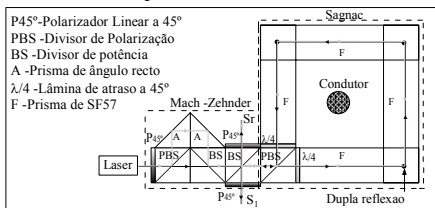


Figura 1 – Esquema do sensor proposto.

O anel de Sagnac foi construído em vidro de baixa birrefringência linear (SF57)<sup>[2]</sup>. Para a radiação descrever um circuito fechado em torno do condutor devem ocorrer reflexões internas nos cantos do quadrado. Para evitar o aparecimento de termos de fase indesejáveis, em cada canto ocorrem duas reflexões com efeitos complementares<sup>[3]</sup>.

No 1º interferómetro, dois modos de polarização linear são separados, seguem percursos diferentes e são de novo recombinados nas saídas. Através de modulação da corrente de injeção do laser, devido à diferença de percursos ópticos (OPD), é possível gerar uma portadora pseudo-heterodina (sinal de

referência  $S_r$ ). Parte da radiação é acoplada ao 2º interferómetro onde os modos de polarização linear são convertidos em circulares por lâminas  $\lambda/4$ , propagam-se no anel de Sagnac em sentidos opostos, e recombinam-se, na saída  $S_1$ , reconvertidos em modos lineares, mas com uma diferença de fase relativa proporcional à corrente (devido à birrefringência circular induzida por  $\vec{H}$ ).

Esta configuração apresenta várias vantagens: a informação da medida na fase não é corrompida por flutuações de potência óptica; a configuração de Sagnac é intrinsecamente insensível a efeitos recíprocos induzidos por temperatura e vibrações, dependendo só de fenómenos não recíprocos como o efeito de Faraday; o uso de processamento pseudo-heterodino evita o ruído electrónico de baixa frequência; a informação da fase de  $S_1$  é extraída com um *lock-in* usando  $S_r$  como referência, conferindo alguma imunidade ao ruído de fase.

O sistema pode ser analisado usando cálculo matricial de Jones<sup>[6]</sup> considerando condições ideais. Quando a corrente de injeção do laser é modulada com um sinal dente-de-serra à frequência  $\omega$ , com amplitude adequada a uma excursão de fase do 1º interferómetro de  $2\pi$ , e ignorando os efeitos de *flyback*, as saídas  $S_1$  e  $S_r$  variam no tempo na forma:

$$\begin{cases} S_r = E_0^2 / 8 (1 + \cos[\omega t + \phi_0]) \\ S_1 = E_0^2 / 16 (1 + \cos[\omega t + 2\theta L + \phi_0]) \end{cases} \quad (2)$$

Onde o termo  $\omega t$  resulta da variação temporal imposta à fase pela modulação do comprimento de onda do laser e  $\phi_0$  é a fase quase-estática do interferómetro Mach-Zehnder. Assim, duas portadoras são obtidas: um sinal de referência com uma fase quase-estática e um sinal de saída com a fase modulada pela corrente a medir. A fase relativa dos dois sinais pode ser obtida com um amplificador *lock-in* e o valor obtido pode ser relacionado com a corrente no condutor usando a equação (1) para calcular  $\theta$ :

$$\theta = 2 \frac{V}{L} \frac{\mu_0 I}{2\pi} \arctan \left[ \frac{L}{2r} \right] \quad (3)$$

onde  $I$  é a corrente eléctrica,  $r$  a distância entre cada prisma e o condutor e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do meio. Com este modelo é possível prever o comportamento de um sensor com os

parâmetros:  $\lambda=850$  nm;  $V_{(SF57)}\approx 11.7$  rad/(m.T);  $r\approx 5$  cm;  $L\approx 38$  cm. Nestas condições prevê-se que a fase, 20L, sofrerá uma excursão de  $360^\circ$  quando uma corrente de 217 kA passa através do condutor, o que corresponde a uma sensibilidade de  $1.7^\circ/\text{kA}$ . É um valor pequeno mas este tipo de sensores é dimensionado para medir correntes muito elevadas.

**Resultados experimentais:** O esquema proposto foi testado em laboratório. Foi usado um diodo laser monomodo a 830 nm. Para evitar reflexões para dentro da cavidade foi usado um isolador óptico e a fibra foi cortada em ângulo. A cabeça sensora, a fonte óptica e o sistema de detecção estavam ligadas por um cabo de fibras ópticas com 50 m: uma fibra monomodo de entrada e duas fibras multimodo de saída. Foi usada uma fonte de corrente de baixa tensão com saídas até  $2000 A_{\text{rms}}$  a 50 Hz para realizar os testes de medição. O laser foi modulado a 2 kHz com uma onda dente-de-serra com amplitude (1.6 mA) ajustada a uma modulação de fase de  $2\pi$  no 1º interferómetro (OPD  $\approx 6$  cm). A fase da portadora  $S_1$  foi medida por um *lock-in* tendo como referência o sinal  $S_r$ . A saída do *lock-in* foi ligada a um analisador de espectros eléctrico onde um sinal eléctrico com amplitude proporcional à fase a 50 Hz ( $V_{\phi 50\text{Hz}}$ ) era monitorizado.

Resultados demonstrando a linearidade de resposta são apresentados na figura 3. Observa-se uma boa correlação entre os dados experimentais e o ajuste linear. O gráfico permite calcular uma sensibilidade de  $1^\circ/\text{kA}$ , o que se aproxima razoavelmente do previsto teoricamente, tendo em conta a simplicidade do modelo.

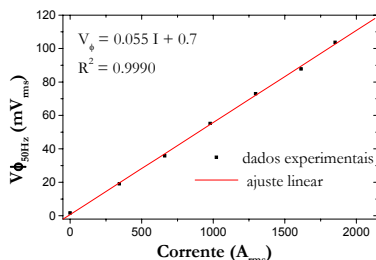


Figura 2 – Variação da fase com a corrente.

O sinal medido foi comparado com a forma de onda aplicada no condutor. Na figura 4, podem ver-se os sinais medidos e as formas de onda aplicadas com valores de corrente de  $1613 A_{\text{rms}}$  e  $819 A_{\text{rms}}$ . Para obter a onda de referência foi colocada uma bobina na vizinhança do condutor, o que introduz um desfaseamento de  $\pi/2$  entre os dois sinais. Os sinais medidos foram filtrados pelo *lock-in* cuja largura de banda estava ajustada para ser ligeiramente superior a 50 Hz. O importante a reter é que o comportamento do sensor é idêntico para dois valores diferentes de corrente aplicada.

A resolução do sistema foi calculada medindo a razão sinal/ruído (SNR) do espectro eléctrico do sinal da fase a 50 Hz quando uma corrente de  $100 A_{\text{rms}}$  era aplicada no condutor. Mediu-se uma SNR de 24.4 dB correspondendo a uma resolução de  $17 A_{\text{rms}}\text{Hz}^{-1/2}$ . Este valor limitado foi atribuído ao elevado nível de ruído de fase presente no sistema. Verificou-se que a modulação da corrente de injeção de diodo laser introduzia um elevado grau de instabilidade espectral, o que se traduzia, através do interferómetro Mach-Zehnder, em ruído de intensidade. Uma estabilização controlada do comprimento de onda de emissão do laser permitirá aumentar significativamente a resolução do sistema.

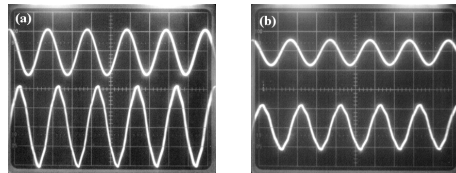


Figura 3 – Sinal aplicado (em baixo), e forma de onda medida pelo sensor (em cima). (a)  $1613 A_{\text{rms}}$ ; (b)  $819 A_{\text{rms}}$ .

A utilização de processamento pseudo-heterodino limita a largura de banda de medição. Tal não constitui problema em aplicações de medição, mas pode ser limitativo para aplicações de monitorização de transitórios de alta frequência. Esta não é uma limitação intrínseca do sensor. É possível implementar processamento homodino activo, ficando a largura de banda do sistema limitada apenas pela electrónica do circuito de *feed-back*.

**Conclusão:** Foram apresentados resultados teóricos e experimentais comprovando o funcionamento de uma nova configuração interferométrica para medição de correntes eléctricas. Observou-se linearidade de resposta e reprodução fiel da forma de onda (50 Hz). Considerou-se a possibilidade de utilização em aplicações de monitorização de transitórios em redes de alta tensão.

**Agradecimentos:** Pedro Jorge agradece o suporte financeiro da FCT através da bolsa de Mestrado (BM/ 21064/99).

## Referências

1. Y.N. Ning et al., "Recent progress in optical current sensing techniques", *Rev. Scientific Inst.*, vol. 5, 66, p. 3097-3111, (1995).
2. Peter R. Forman and F.C. Jahoda, "Linear birefringence effects on fiber-optic current sensors", *App. Optics*, vol.27, 15, p. 3088-3096, (1988).
3. Tadashi Sato et al., *Method and apparatus for optically measuring a current*, US Patent nº 4564754, Hitachi, 1986.
4. N.C. Pistoni, "Simplified approach to the Jones Calculus in retracing optical circuits", *App. Optics*, vol. 34 ,34, (1995).