

# CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DE CONTROLADORES ELETRO-ÓPTICOS DE POLARIZAÇÃO A TENSÕES BIPOLARES MULTINÍVEIS

*Fernando Alves Rodrigues*

Inmetro, Duque de Caxias, Brasil, farodrigues@inmetro.gov.br

**Abstract:** O objetivo deste trabalho é caracterizar a resposta de controladores de polarização eletro-ópticos quando estes são submetidos a tensões bipolares multiníveis, não simétricas, reduzindo para a metade os valores de tensão necessários para prover a mesma transformação de polarização quando tensões unipolares são utilizadas. Estes requisitos são particularmente interessantes para realização de um modulador PolSK (*Polarization Shift Keying*).

**Key words:** fibra óptica, polarização, eletro-óptico, caracterização, PolSK, MOSFET.

## 1. CONCEITOS GERAIS

Controladores ou transformadores de polarização eletro-ópticos são uma escolha natural para serem utilizados como moduladores de polarização, estes dispositivos são práticos e de uso simples, contudo apesar das facilidades, alguns dispositivos têm a desvantagem de necessitar de tensões nominais da ordem 50 volts [1], o que na prática inviabiliza seu uso como moduladores de alta frequência. Controladores de polarização são utilizados para diversas funções entre as quais podemos citar os compensadores de PMD (*Polarization Mode Dispersion*) e moduladores de comunicação denominados moduladores *PolSK* (*Polarization Shift Keying*) [2]. Enquanto um compensador de PMD tenta mitigar os efeitos da polarização em fibras ópticas, um modulador PolSK produz variações nos estados de polarização da luz para transmitir informações, através de fibras ópticas ou no espaço livre (FSO – *Free Space Optics*).

Um modulador PolSK permite que a informação seja codificada nos estados de polarização da luz, estes estados de polarização por sua vez podem ser descritos através dos parâmetros de Stokes [2]. Os parâmetros de Stokes são extraídos da teoria eletromagnética, desta forma necessitamos recorrer ao adequado formalismo matemático para sua descrição.

Dado um plano de referência  $x, y$ , normal ao eixo de propagação de um campo eletromagnético, podemos descrever uma onda de luz totalmente polarizada através das seguintes expressões:

$$E_x = a_x(t)e^{j(\omega t + \phi_x(t))} \quad (1)$$

$$E_y = a_y(t)e^{j(\omega t + \phi_y(t))} \quad (2)$$

$$\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} \quad (3)$$

Tomando como base as equações (1), (2) e (3), os parâmetros de Stokes podem ser calculados na forma:

$$S_1 = a_x^2 - a_y^2 \quad (4)$$

$$S_2 = 2a_x a_y \cos \delta \quad (5)$$

$$S_3 = 2a_x a_y \sin \delta \quad (6)$$

$$\text{Onde } \delta = \phi_x - \phi_y$$

Um quarto parâmetro denominado  $S_0$  representa a densidade de potência eletromagnética total na direção de propagação definida e é dado na forma:

$$S_0 = a_x^2 + a_y^2 \Leftrightarrow S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (7)$$

Ao chavear entre diferentes estados de polarização, estaremos chaveando dentro do espaço de informação denominado *espaço de Stokes*. No receptor, os parâmetros de Stokes, representados por intensidades de sinais de potência, simplificam a demodulação do sinal e a recuperação de suas componentes vetoriais. Cada estado de polarização, após passar pelo discriminador, representará um símbolo binário de tamanho proporcional à quantidade dos diferentes estados transmitidos.

Um transmissor PolSK se tornará atrativo na medida em que conseguir modificar os estados de polarização da luz a taxas compatíveis com os requisitos de banda da atualidade, adicionalmente estes estados de polarização deverão possuir, dentro do espaço tridimensional de Stokes, uma distância tal que permitam a sua discriminação no receptor. As vantagens de se trabalhar num espaço tridimensional são várias, entre elas podemos citar:

1. a distância de Hamming decai com menor velocidade no  $\mathbb{R}^3$  que no  $\mathbb{R}^2$  [3], para uma mesma ordem de constelação de símbolos.
2. a máxima eficiência espectral teórica que pode ser atingida [4], para quatro estados de polarização distintos é de 2 bits/Hz e com 16 diferentes estados de polarização obteríamos uma eficiência espectral de 4 bits/Hz.
3. a modulação PolSK pode apresentar amplitude *praticamente constante* [5], minimizando efeitos não lineares de propagação em fibras ópticas.

## 2. MOTIVAÇÃO

A caracterização da resposta de controladores de polarização possibilita uma melhor compreensão dos parâmetros de projeto para um transmissor PolSK com modulação direta. No domínio da eletrônica existe uma conhecida relação de compromisso (tensão *versus* velocidade de chaveamento) que praticamente determina o limite de desempenho de um dispositivo eletro-óptico. Dentro deste contexto, é interessante buscar formas eficientes de reduzir as tensões de chaveamento para moduladores de polarização eletro-ópticos, devemos adicionalmente levar em conta a necessidade da manutenção de um adequado mapeamento e codificação dos estados de polarização.

### 2.1. Retardadores eletro-ópticos lineares



Figura 1 - Controlador de polarização multistágio.

Os controladores de polarização com resposta linear não impõem, *a priori*, restrições em relação às polaridades das tensões de excitação. Contudo, o grau de liberdade para estas tensões não é ilimitado. Para o dispositivo mostrado na **Figura 1**, por exemplo, existe uma restrição para o máximo valor das voltagens que podem ser submetidas aos estágios adjacentes, naquele caso o típico valor máximo é de 80 Volts [6]. Cada estágio pode se comportar como linhas de retardo de  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  ou  $\lambda/8$ , de acordo com as tensões aplicadas em seus terminais. Entre as configurações de controle possíveis para este dispositivo podemos, por exemplo, utilizar um único estágio do dispositivo para operar como uma linha de retardo de  $\delta$  comprimentos de onda e com ângulo de orientação  $\alpha/2$ , as tensões de operação necessárias são fornecidas pelas equações:

$$V_A = 2 \cdot V_0 \cdot \delta \sin(\alpha) - V_\pi \cdot \delta \cos(\alpha) + V_{A,BIAS} \quad (8)$$

$$V_B = \text{Ground} \quad (9)$$

$$V_C = 2 \cdot V_0 \cdot \delta \sin(\alpha) - V_\pi \cdot \delta \cos(\alpha) + V_{C,BIAS} \quad (10)$$

Para mapear o espaço de Stokes podemos lançar mão de vários arranjos com linhas de retardo de  $\lambda/2$  onda e/ou  $\lambda/4$  de onda, cujos comportamentos serão praticamente determinados pela escolha das tensões  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ .

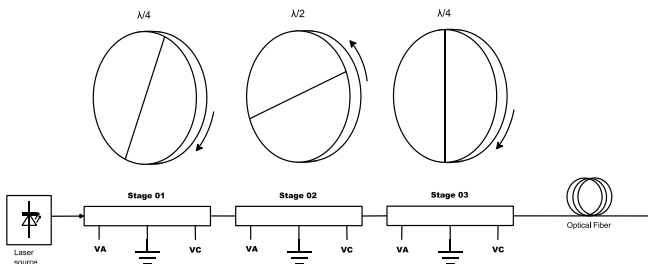


Figura 2 - Arranjo de linhas de retardo compondo um transformador de polarização arbitrário para arbitrário.

A Figura 2 mostra uma configuração, descrita em [7], que apresenta um grau de liberdade bastante amplo. Este arranjo, composto de uma linha de retardo (*wave plate*) de  $\lambda/4$  de onda, seguido de uma de  $\lambda/2$  e outra de  $\lambda/4$ , pode transformar um estado de polarização linear (fonte laser) de entrada para um estado de polarização arbitrário de saída. Para explorar o máximo do espaço de bit disponível e excitar o arranjo série citado, o dispositivo que atua como *driver* eletrônico deverá ser capaz de chavear quatro tensões, duas a duas, com valores e polaridades independentes. Devido aos requisitos de alta velocidade e tensões relativamente altas para a faixa de frequência desejada, circuitos MOSFET são uma opção de projeto.

### 2.2. Circuitos MOSFET

Os *drivers* MOSFET são robustos e podem chavear cargas puramente resistivas, capacitivas e/ou indutivas. Alguns fabricantes disponibilizam circuitos que integram grande parte das funções requeridas para a construção de um *driver* multicanal multinível. Em altas frequências, as formas de onda geradas pelos *drivers* MOSFET estão fortemente relacionadas ao tipo de carga. Adicionalmente é necessário levar em consideração a resposta a sinais do tipo RZ e NRZ. A figura abaixo mostra resultados de uma simulação para um sinal multinível NRZ, com frequência de apenas 1 MHz sobre um circuito RC paralelo ( $R=56$  ohms  $C=220$  pF).

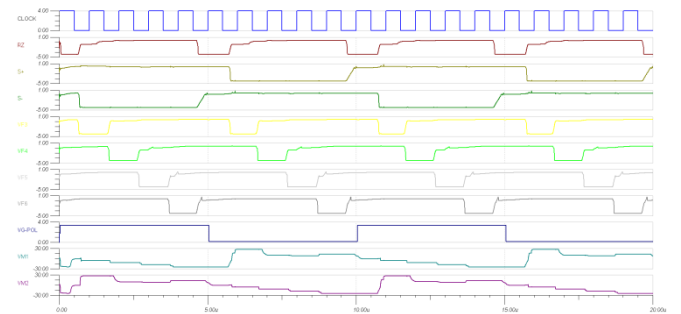


Figura 3 - Gráfico dos sinais de controle e sinal NRZ gerado numa simulação de driver eletrônico com quatro pares de tensão de saída,  $f=1\text{MHz}$ , máxima tensão=30Volts.

As simulações em questão permitem obter dados qualitativos uma vez que em frequências mais altas, da ordem de 100 MHz, o circuito tem um comportamento elétrico diferente devido ao aparecimento de reatâncias parasitas ou da própria carga (estágios do controlador). Neste sentido a caracterização da resposta obtida pelo conjunto *driver/controlador* ajudará a melhorar o entendimento deste subsistema.

## DADOS OBTIDOS

Os dados obtidos até agora caracterizam a resposta simétrica para tensões chaveadas manualmente.

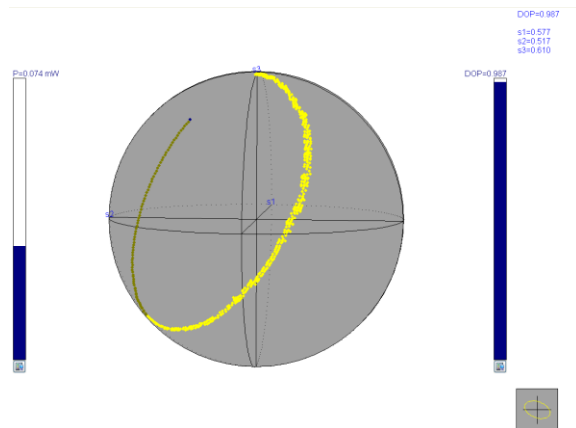


Figura 4 - Transformação obtida com um arranjo de dois estágios em paralelo, com excursão simétrica de 0 a 30 Volts de  $V_A$  e  $-V_C$ , aplicadas simultaneamente a todos os dois estágios.

Medidas de laboratório caracterizaram o funcionamento de estágios de um controlador ligados em modo paralelo elétrico (ver Figura 4). Nesta configuração dois estágios adjacentes (1 e 2) tiveram seus pinos correspondentes conectados à mesma tensão, ou seja:  $\{V_{A1} = V_{A2}\}$  e  $\{V_{C1} = V_{C2}\}$ . Observamos que, conforme o esperado, há um reforço na relação ângulo de desvio/tensão de excitação.

Quando dois estágios adjacentes foram ligados em modo antiparalelo elétrico,  $\{V_{A1} = \pm V_{A2}\}$  e  $\{V_{C1} = \pm V_{C2}\}$ , dependendo dos valores de tensão aplicados, obtivemos excursões fixas sobre eixos *transversais* definidos (ver Figura 5). As características demonstradas indicam que é possível, com apenas 04 estágios e através do efeito de rotação, mapear os **principais estados de polarização** (PSPs), sobre um espaço de Stokes tridimensional.

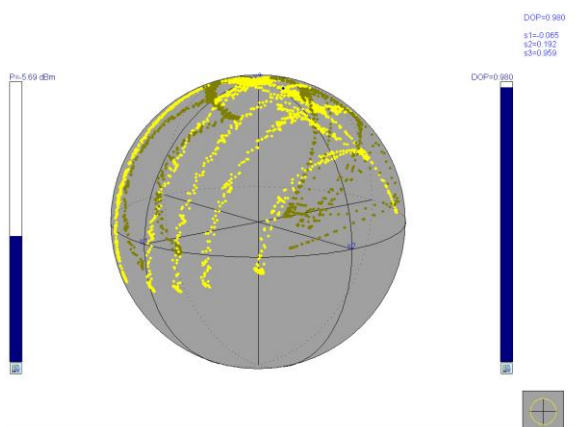


Figura 5 - Transformação obtida com um arranjo de dois estágios em anti-paralelo, com excursão não simétrica (não simultânea) de 0 a 30 Volts de  $V_A$  e  $-V_C$  para cada um dos estágios.

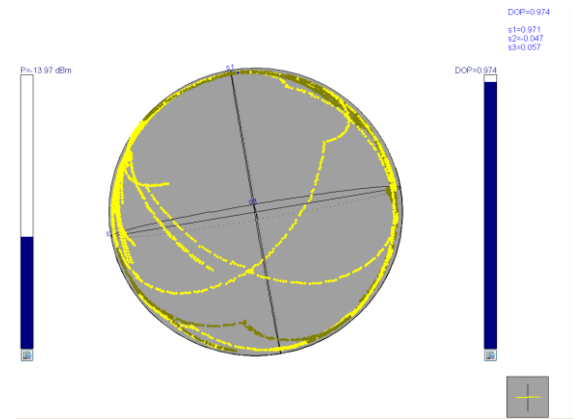


Figura 6 - Transformação obtida com único estágio, excursão simétrica (alternada) de 0 a 30 Volts de  $\pm V_A$  e  $\pm V_C$ .

O mapeamento da Figura 6 foi obtido com um único estágio, neste caso com as tensões  $\pm V_A$  e  $\pm V_C$  excursionadas manualmente, foi necessário realizar pós-processamento dos dados obtidos. Os dados tabulados foram exportados para uma planilha eletrônica. Na planilha, os valores correspondentes ao parâmetro Stokes  $S_3$  normalizado foi filtrado uma faixa contida em  $\pm 0,05$  em relação ao equador da esfera de Poincaré, os parâmetros Stokes resultantes são mostrados na Figura 7.

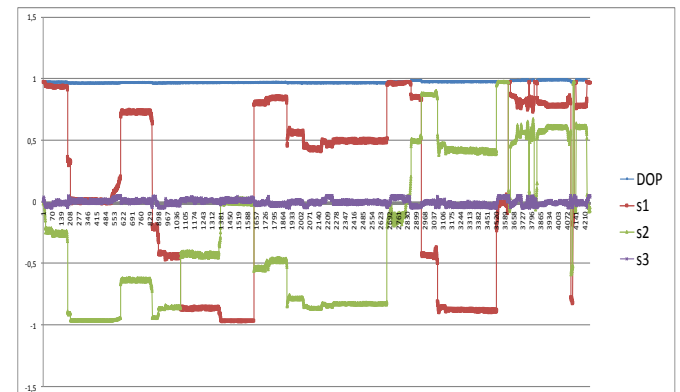


Figura 7 - Parâmetros Stokes normalizados de estados de polarização medidos em um único estágio de retardo, com inversão das polaridades de  $V_A$  e  $V_C$ .

As curvas mostradas na Figura 8 representam parâmetros estimados, valores medidos (valor do off-set) e valores teóricos calculados a partir da equações (8) (9) e (10). Na curva medida é possível observar o efeito de histerese (entre  $180^\circ$  e  $270^\circ$ ) provocado pela inversão de polaridade entre as tensões  $V_{A3}$  e  $V_{C3}$ . Quantificar a histerese é um passo importante, que viabiliza a correção das tensões de chaveamento do modulador simétrico. Desta forma, o modulador eletro-óptico resultante não deverá ser exatamente simétrico e deve sim refletir em seus níveis de tensão as características dinâmicas do controlador de polarização.

Na Tabela 1 podemos observar os dados utilizados para gerar o gráfico da Figura 8. Neste exemplo,  $\delta = \lambda/2$ ;  $V_p$  (módulo de  $V_p$ ) = 36V;  $V_0 = 1V$  e o off-set = 4,5V. Nesta tabela o dados são comparados com os valores medidos e representados nas Figura 6 e 7.

Tabela 1 - Tabela iterativa entre dados teóricos e medidos.

Valores calculados para waveplate de $\lambda/2$						Dados medidos	
$V_A$ (Bias) (V)	Off Set (V)	$V_C$ (Bias) (V)	a(deg)	$V_{A,1}$ (V)	$V_{C,1}$ (V)	$V_{A,3}$ (V)	$V_{C,3}$ (V)
16	4,5	-20,5	0	-2,00	-2,50	0,00	0,00
16	4,5	-20,5	30	0,91	-4,41	4,40	-7,40
16	4,5	-20,5	60	7,87	-10,63	10,20	-15,20
16	4,5	-20,5	90	17,00	-19,50	14,90	-22,60
16	4,5	-20,5	120	25,87	-28,63	20,50	-29,60
16	4,5	-20,5	150	32,09	-35,59	29,00	-36,00
16	4,5	-20,5	180	34,00	-38,50	33,30	-41,20
-16	4,5	11,5	210	-0,91	-4,59	-4,00	10,30
-16	4,5	11,5	240	-7,87	1,63	-2,70	20,40
-16	4,5	11,5	270	-17,00	10,50	-15,60	20,10
-16	4,5	11,5	300	-25,87	19,63	-19,81	22,20
-16	4,5	11,5	330	-32,09	26,59	-23,61	26,70
-16	4,5	11,5	360	-34,00	29,50	-29,41	31,30

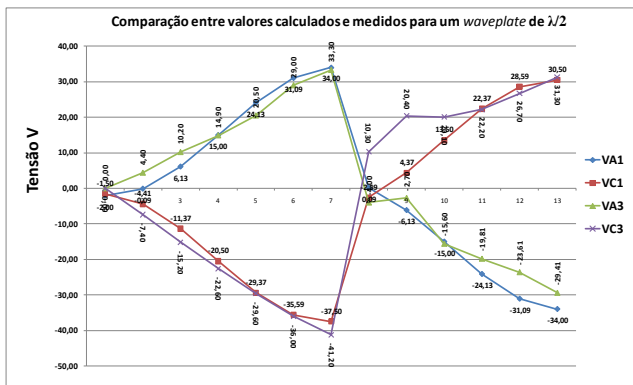


Figura 8 - Comparação entre a curva teórica ( $V_{A1}$  e  $V_{C1}$ ) e valores medidos ( $V_{A3}$  e  $V_{C3}$ ) para excursão simétrica.

\* Obs: Entre 180° e 270° podemos observar os efeitos da histerese.

### 3. CONCLUSÃO

Com as medidas realizadas, obtivemos parâmetros importantes para a construção de uma interface eletro óptica de um modulador PolSK. Os dados obtidos evidenciaram que, com conjuntos adequados de estágios do controlador de polarização, é possível mapear estados de polarização antipodais com tensões máximas inferiores a 20 volts, também foi verificado que a alternância das tensões de chaveamento permite o mapeamento sobre *planos virtuais de polarização* (planos ortogonais aos PSPs – ver Figura 5), estes PSPs por sua vez podem integrar pontos de constelações tridimensionais PolSK. Com base nos resultados haverá uma redução nas tensões de excitação, que devem ser fornecidas pelos *drivers* MOSFET, fato que permitirá maiores velocidades de chaveamento. Simultaneamente, a alternância nas polaridades destas tensões além de aumentar o espaço mapeado, também permitirá tratar efeitos reativos resultantes da associação de estágios em paralelo e principalmente o efeito de histerese

observado na Figura 8. As incertezas associadas aos resultados não foram calculadas. É importante notar que o polarímetro, principal equipamento utilizado nas medidas, foi operado com taxas de 2500 amostras por segundo e que o desvio máximo dos resultados medidos (para medidas de estados de polarização) é menor que 1%, conforme informado pelo fabricante.

### 4. TRABALHOS FUTUROS

Novas medidas serão realizadas para caracterizar a resposta dinâmica de um arranjo série de linhas de retardo (estágios do controlador) de  $\lambda/4$  e  $\lambda/2$  de onda que formarão um transformador de polarização arbitrário, este arranjo será conectado a *drivers* eletrônicos com velocidades de 40 a 100 MHz. Os pares de tensão serão escolhidos de tal forma que transformações sequenciais para estados de polarização antipodais, formem uma constelação de, no mínimo, 4 (quatro) estados de polarização da modulação PolSK, permitindo atingir a eficiência espectral mínima prevista de 2 bits/Hz. O circuito deverá prever recursos para minimizar o efeito de histerese observado na transição de polaridade.

### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao apoio da Ditel – Divisão de Metrologia em Telecomunicações, a Dimci - Diretoria de Metrologia Científica do Inmetro, ao imprescindível, suporte e orientação do Laboratório de Optoeletrônica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - curso de mestrado em Eletromagnetismo Aplicado.

### 6. REFERÊNCIAS

- [1]. HIDAYAT, A. **Fast Endless Polarization Control for Optical Communication Systems**. Universitat Paderborn. Paderborn. 2008.
- [2]. BENEDETTO, S.; POGGIOLINI, P. Theory of polarization shift keying modulation. **IEEE Transactions on Communications**, 40, 1992. 708-721.
- [3]. PIZURICA, A.; SENK, V.; PIZURICA, V. An Application of Spherical Codes to Polarization Shift Keying Modulation. **Electronics and Energetics**, 11, 1998. 207-221.
- [4]. CHEN, Z. et al. **Multi-Envelope 3-Dimensional Constellations for Polarization Shift Keying Modulation**. 2010 International Conference. [S.l.]: Information and Communication Technology Convergence (ICTC). 17-19 Nov. p. 173-174.
- [5]. WEISHENG HU, S. S. P. K. E. Effect of Polarization Dependent Loss on Polarization-Shift-Keying Transmission System. In: **Proceedings of SPIE**. [S.l.]: [s.n.], v. 4906, 2002.
- [6]. EOSPACE. POLARIZATION Controllers. Disponível em: <www.eospace.com/polarization\_controller.htm>. Acesso em: 11 março 2011.
- [7]. DAMASK, J. N. **Polarization Optics in telecommunications**. [S.l.]: Springer, 2004.