

# Avanços Recentes em Optoeletrônica Aplicada a Radares e Guerra Eletrônica

Carla de Sousa Martins

Departamento de Microondas e Optoeletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Mal Eduardo Gomes nº. 50, Jardim das Acácias – São José dos Campos – SP – Brasil

**Resumo** — O progresso da fotônica nos últimos anos sugere a aplicação de componentes optoeletrônicos em radares e sistemas de guerra eletrônica, com possibilidades de alcançar ótimos níveis de desempenho. Este artigo descreve alguns dos avanços tecnológicos, recentemente apresentados em publicações técnicas internacionais, aplicáveis a sistemas de microondas, especialmente radares e sistemas de guerra eletrônica.

**Palavras-chaves** — Radar, Guerra Eletrônica, Links Ópticos, Duplexers Optoeletrônicos.

## I. INTRODUÇÃO

Na última década, vários dispositivos e componentes optoeletrônicos foram desenvolvidos e comercializados, impulsionados principalmente pelo mercado de telecomunicações, os quais atingiram níveis de desempenho próximos aos requisitos militares. Por se tratar de uma tecnologia que utiliza simultaneamente as características dos componentes associadas aos sinais de RF e fotônicos, a optoeletrônica também tem sido denominada de “RF Photonics”. Componentes dessa natureza, operando até a faixa de 40 GHz, com boa performance em termos de faixa dinâmica, pureza espectral e relação sinal-ruído, permitem realizar a transmissão e o processamento óptico de sinais de microondas analógicos de banda larga. Processadores, assim concebidos, podem atingir velocidades de processamento duas ou três ordens de grandeza maiores daquelas obtidas por processadores eletrônicos digitais de alta velocidade, para o mesmo tamanho, peso e consumo. Aliada a essa capacidade inerente de paralelismo da óptica, a baixa sensibilidade a perturbações eletromagnéticas das transmissões em fibras ópticas são algumas das características que incentivam a adoção de novos conceitos e suas aplicações em sistemas militares navais, aéreos e terrestres.

Outro estímulo à adoção de tecnologia optoeletrônica em sistemas radar é o fato de que os sistemas atuais necessitam cada vez mais de transmitir sinais analógicos com faixa dinâmica elevada e sinais digitais com alta taxa de bits. No caso de sistemas eletrônicos convencionais, esta demanda crescente em processamento implica em um maior número de componentes e, conseqüentemente, em aumento de consumo de potência e problemas de compatibilidade eletromagnética (EMC). Além das características já mencionadas, a tecnologia de optoeletrônica oferece também altíssima capacidade de integração.

Os avanços da optoeletrônica permitem hoje a realização de diversas funções típicas de um sistema radar, tais como filtragem adaptativa, chaveamento de alta velocidade, geração de formas de onda complexas e controle de antenas *phased-array* com largura de banda instantânea alta. O uso de links ópticos a fibra óptica permite, por exemplo, o envio de sinais

a uma antena cuja distância para o transmissor pode ser da ordem centenas de metros, com altíssimo nível de confiabilidade e mínimas perdas.

Este artigo recorre aos resultados disponíveis em literatura recente para descrever alguns avanços em optoeletrônica aplicáveis a sistemas radar e de guerra eletrônica, em especial links ópticos analógicos de microondas e Duplexers optoeletrônico de RF para operação simultânea em mesma frequência.

## II. LINK ÓPTICO DE MICROONDAS

Esta seção baseia-se nos resultados apresentados em [1], onde o projeto de um link óptico otimizado é apresentado. Dentre os vários tipos de sinais a serem transmitidos em um sistema radar, foram escolhidos sinais de oscilador local (LO) e sinais de RF pulsados em modo de emissão. Sistemas radar requerem osciladores locais com elevada resolução espectral, a fim de realizar a conversão do sinal recebido para frequências mais baixas com o mínimo de ruído. As vantagens da transmissão óptica de sinais LO são essencialmente: a imunidade intrínseca, a complexidade reduzida e a possibilidade de incorporar características adicionais com o uso, por exemplo, de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). Em sistemas radar navais e terrestres, links ópticos de microondas são utilizados para transmitir sinais analógicos e digitais entre a parte estacionária (*shelter*) e a parte rotativa (antena).

Os requisitos em [1] foram divididos da seguinte forma:

- *Sistemas radar navais e terrestres*: requerem links ópticos de banda estreita e utilização de WDM devido à junta rotativa, com ruído de fase próximo à portadora entre -155 dBc/Hz para a menor frequência LO e -140 dBc/Hz para a mais alta frequência LO, relativo a aplicações na banda S.
- *Sistemas radar aéreos*: requerem links ópticos de banda larga, operando até 18 GHz. A demanda de faixa dinâmica encontra-se na faixa de 80 dB.

Tendo em vista o objetivo desse artigo, é conveniente apresentar uma visão geral das técnicas de modulação óptica e redes de casamento de impedância e, em seguida, descrever alguns dos resultados obtidos em [1], aqui considerados mais significativos.

### A. Visão geral sobre técnicas de modulação óptica e redes de casamento de impedância

Os métodos de modulação óptica utilizados englobam a modulação direta de um LED semiconductor ou de um diodo laser e a modulação externa dessas mesmas fontes usando um

dispositivo eletro-óptico ou acusto-óptico. A Fig. 1 apresenta um diagrama de blocos simplificado de um link óptico utilizando modulação direta de um diodo laser. Como meio de propagação, os links ópticos atuais utilizam principalmente fibras monomodo. Dois tipos de laser são tipicamente utilizados em transmissores analógicos de banda larga: FP (*Direct Modulated Fabry-Perot Laser*) e DFB (*Distributed Feedback Laser*). Os receptores ópticos empregam tipicamente dois tipos de fotodetectores: fotodiodo PIN (*Positive Intrinsic Negative*) e fotodiodo de avalanche ou APD (*Avalanche Photodiode*).

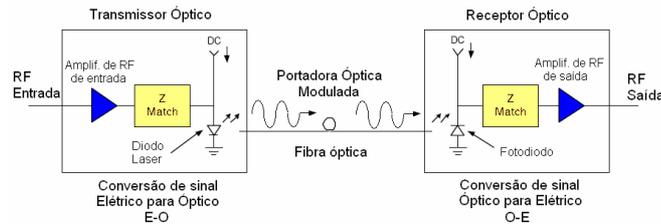


Fig. 1. Link óptico utilizando modulação direta do diodo laser.

A Fig. 2 apresenta um diagrama de blocos simplificado de um link óptico utilizando modulação externa de uma fonte óptica, utilizando o efeito eletro-óptico. O modulador eletro-óptico tipicamente utilizado nessa configuração é o modulador Mach-Zehnder. Usualmente, para uma maior eficiência em microondas e linearidade, uma fonte óptica de maior potência é preferida, como os lasers de estado sólido tal qual o laser Nd:YAG [2].

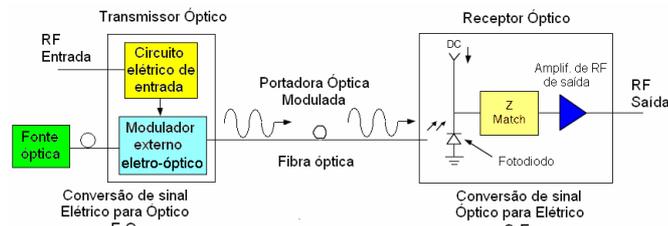


Fig. 2. Link óptico utilizando modulação externa.

As redes de casamento podem ser passivas (resistivas e reativas) ou ativas. As redes de casamento resistivas consistem basicamente em adicionar-se um elemento resistivo em série com o dispositivo de entrada. Tipicamente a impedância do sistema é da ordem de  $50 \Omega$  enquanto a resistência equivalente de um laser semiconductor é da ordem de  $5 \Omega$ . Embora este tipo de casamento ofereça operação em toda a faixa, o que é apreciado em operações digitais com altas taxas de bits, as perdas são muito acentuadas, pois não maximiza a transferência de potência entre o gerador de RF e o laser, ou entre o fotodiodo e a carga.

A utilização de uma rede de casamento reativa (elementos resistivos, indutivos e capacitivos) melhora as perdas de retorno (reflexão) na entrada e na saída e reduz as perdas de inserção. Contudo, a operação em banda larga é mais difícil de ser conseguida. Para otimizar essas características (perdas, operação em banda larga, figura de ruído etc.), amplificadores de microondas de transimpedância (MTA – *Microwave Transimpedance Amplifier*) surgem como uma boa opção de uso em links ópticos com modulação direta do laser semiconductor [3].

## B. Experimento

1) *Condições Ambientais*: Todos os módulos foram testados em temperaturas entre  $-40^\circ\text{C}$  a  $+85^\circ\text{C}$ , sem redução de desempenho. Também passaram por testes de exposição a campo eletromagnético ( $200\text{V/m}$  na banda Ku), choque ( $0,01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ,  $10 \text{ Hz}$  a  $1 \text{ kHz}$ , e  $0,02 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ,  $1 \text{ kHz}$  a  $2 \text{ kHz}$ ) e vibração (aleatória –  $0,01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ,  $5$  a  $100 \text{ Hz}$ , senoidal –  $1 \text{ g}$  de  $15$  a  $150 \text{ Hz}$ ). De acordo com [1], nenhuma degradação foi constatada durante os testes e depois destes. Os links também atendem aos requisitos de EMC da MIL-STD-461 para equipamentos terrestres.

2) *Arquitetura*: Um demonstrador foi montado para distribuição de sinais em radares com antenas rotativas, conforme mostra a Fig. 3.

Quatro sinais analógicos são transmitidos através da junta rotativa:

- LO 1: 4 GHz, largura de banda de 400 MHz;
- LO 2: 1 GHz, sinal CW;
- LO 3: 50 MHz, sinal CW;
- RF: Sinal pulsado, banda S, largura de banda de 400 MHz.

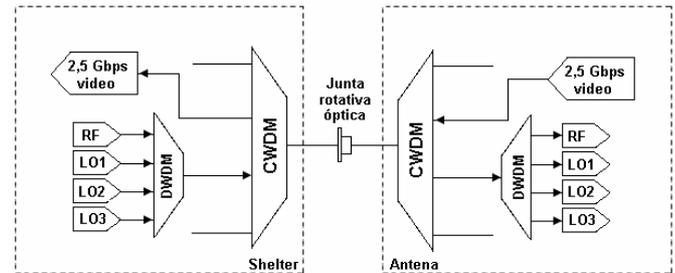


Fig. 3. Arquitetura do demonstrador.

Um sinal digital foi adicionado no sentido oposto. Este link digital é dedicado à transmissão de um sinal analógico recebido pela antena e convertido em digital na própria antena.

Em todos os links analógicos foram utilizadas redes de casamento reativa. Para frequências inferiores a 2 GHz (LO 2 e LO 3) foi utilizado um método baseado em células ressonantes. Um circuito equivalente RL é determinado para o diodo laser e um circuito equivalente RC é determinado para o fotodiodo. Para atingir uma perda de reflexão melhor que  $-10 \text{ dB}$  em 10% da banda, uma rede de casamento passa-banda de 4ª ordem foi utilizada. Para frequências superiores a 2 GHz (LO 1 e RF), o casamento é feito por meio de transformadores de quarto de onda. Maiores detalhes podem ser consultados em [4].

## C. Resultados

1) *Módulos integrados*: Visando principalmente aplicações em sistemas aéreos, que requerem um nível de integração alto, o uso de foto-emissor e foto-detector integrados fornece grandes vantagens. No mesmo módulo foram integrados amplificador, chip laser ou chip fotodiodo e redes de casamento de impedância, a fim de manter uma relação sinal-ruído alta em toda a faixa da banda Ku. Circuitos integrados de Microondas Monolíticos (MMIC – *Monolithic Microwave Integrated Circuit*) foram fabricados (Fig. 4), proporcionando a implementação de um link fotônico otimizado em banda larga com baixas perdas (inferiores a 10 dB).

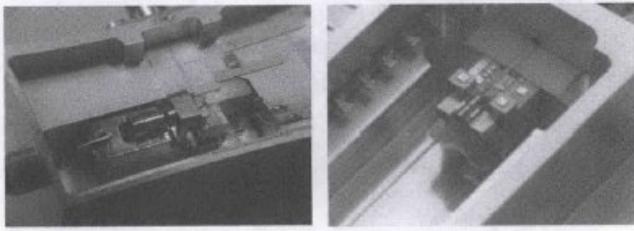


Fig. 4. Módulos emissor e receptor integrados, aplicações em banda larga.

2) *Resposta em frequência:* A Fig. 5 mostra a resposta em frequência de um link óptico com modulação direta sem amplificador associado com o diodo laser (curva verde) e com um amplificador de transimpedância [3] que otimiza o link fotônico e proporciona perdas bem menores (curva escura).

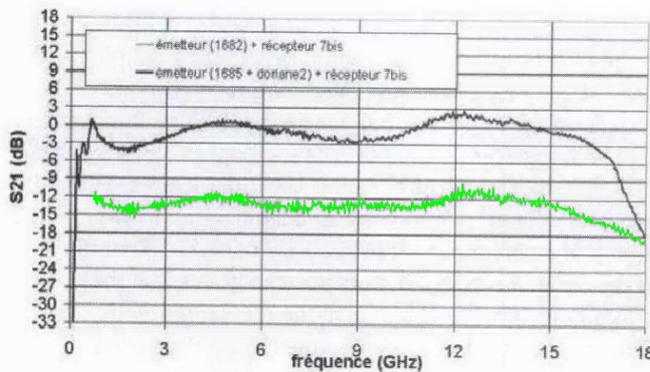


Fig. 5. Resposta em frequência do link com modulação direta.

3) *Perdas de inserção e ruído de fase:* A tabela 1 apresenta as perdas de inserção medidas no demonstrador (incluindo as perdas ópticas e o valor absoluto do parâmetro S21 obtido pela subtração dessas perdas ópticas) e o ruído de fase próximo à portadora ( $L(f)$ ). Note que as perdas ópticas são convertidas duas vezes em dB no domínio elétrico.

TABELA I: PERDAS DE INSERÇÃO DOS DIFERENTES LINKS DO DEMONSTRADOR (VALORES MEDIDOS E ABSOLUTOS) E RUÍDO DE FASE PRÓXIMO À PORTADORA MEDIDO COM OFFSET DE 1 MHz EM RELAÇÃO À PORTADORA.

	LO3	LO2	LO1	RF
S21 Medido (dB)	-15,5	-16	-31,7	-25
Perdas ópticas (dB)	8	8	8,4	6,2
S21 Absoluto (dB)	0,5	0	-14,9	-12,6
$L(f)$ em 1 MHz (dBc/Hz)	-158	-151	-147	-143

Como mostrado na tabela, os links LO3 e LO2 não apresentaram perdas e mesmo um pequeno ganho para o link LO3, o que representa um aumento de 20 a 25 dB se comparado com os links padrões, usados em telecomunicações, que usam casamento resistivo. Para o sinal de RF, o espectro do ruído de fase próximo à portadora corresponde a uma estabilidade de fase de cerca de 80 dB em uma largura de banda de 1 MHz. Uma medida de estabilidade pulso a pulso confirmou este valor. A redução de perdas devido à rede de casamento de impedância reativa permitiu alcançar os valores de fundo

de ruído de fase próximo à portadora (-155 dBc/Hz a -140 dBc/Hz) e de estabilidade de fase (80 dB em 1 MHz) requeridos para sinais LO e RF pulsado.

### III. DUPLEXER OPTOELETRÔNICO DE RF PARA OPERAÇÃO SIMULTÂNEA EM MESMA FREQUÊNCIA

Em [5] é apresentada uma técnica optoeletrônica para reduzir a interferência (*leakage*) entre os canais de transmissão/recepção (T/R) a fim de permitir operação T/R simultânea de sinais banda larga, na mesma frequência, em uma mesma antena. Muitos sinais de comunicações e de radares frequentemente recebem sinais de RF muito fracos na presença dos sinais transmitidos muito mais fortes. Nestes sistemas, o vazamento do sinal transmitido no percurso de recepção pode degradar bastante a recepção, devendo assim ser minimizada. Em sistemas onde as frequências de transmissão/recepção (T/R) são idênticas, a utilização de filtros não é uma opção. Por outro lado, T/R simultânea na mesma antena é uma consideração importante sob o ponto de vista de custo e tamanho. As configurações de duplexers mais comuns baseiam-se em frequências de T/R diferentes ou em chaves de RF de alta velocidade. Embora estas soluções proporcionem T/R na mesma antena, nem a mesma frequência nem a transmissão simultânea são possíveis.

O princípio de operação da técnica proposta é ilustrado na Fig. 6. Note que a apresentação de configuração com duas antenas visa tão somente facilitar o entendimento da técnica, não sendo absolutamente uma condição restritiva. O sinal a ser transmitido (TX) é igualmente dividido pelo divisor de potência de  $0^\circ$  e transmitido para duas antenas casadas através de circuladores (RFC). Apenas uma das antenas é usada para recepção. O isolamento finito dos circuladores, em conjunto com as perdas de retorno finitas (S11) dessas antenas, causa reflexão do sinal TX na direção do sinal RX. Assumindo que os circuladores estão casados, estes sinais de reflexão podem ser cancelados numa combinação de  $180^\circ$ . Em sistemas T/R duplex que utilizam técnicas optoeletrônicas, a função de um combinador de  $180^\circ$  pode ser implementada nos domínios óptico, elétrico ou híbrido eletro-óptico.

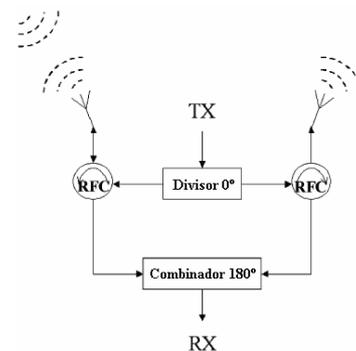


Fig. 6. Configuração básica para redução/cancelamento de interferência da transmissão no percurso de recepção.

#### A. Experimento

A configuração do experimento é mostrada na Fig. 7. Duas antenas na banda X são conectadas às duas portas de um modulador tipo Mach-Zehnder (MZM) em  $\text{LiNbO}_3$ , fabricante COVEGA (DC  $V_\pi \sim 3$  V, BW  $\sim 12$  GHz), por meio de circuladores elétricos. A terceira porta de cada circulador é

conectada a um divisor de potência balanceado. Um sinal com varredura em frequência (TX), proveniente da porta 1 de um analisador de rede vetorial (VNA), é aplicado ao divisor de potência. Este sinal modula dois lasers banda C operando em 1552,3 e 1556,3 nm, conectados ao modulador através de dois circuladores ópticos que mantêm a polarização (*polarization maintaining*). Um par de fotodetectores diferenciais balanceados (PDs) foi utilizado em uma estrutura combinada com um elemento de retardo óptico variável e com o circuito de polarização (Discovery Semiconductors DSC720-39-Lab Buddy). O sinal detectado (RX) foi medido na porta 2 do VNA.

Primeiramente, a porta 1 do VNA foi conectada diretamente à porta de RF do modulador, através do circulador, sem passar pelo divisor de potência balanceado, e a porta 2 foi conectada aos fotodetectores diferenciais. A resposta em frequência desta configuração foi medida, servindo de base para a resposta em frequência do sistema duplex na direção da recepção.

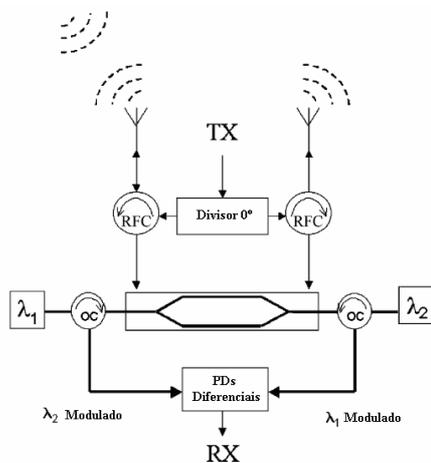


Fig. 7. Configuração utilizando modulador Mach-Zehnder (MZM). OC: circulador óptico que mantém a polarização. RFC: Circulador de RF. PD: fotodetectores.

A seguir, a mesma medida foi realizada, só que agora com as duas portas do modulador conectadas à porta 1 do VNA através do divisor de potência. Esta medida serve como referência para a melhor condição alcançável de cancelamento do sinal TX no receptor, visto que as duas portas do modulador recebem sinais bastante simétricos, limitados apenas por pequenos desbalanceamentos no divisor de potência e nos percursos percorridos pelos sinais ópticos e de RF.

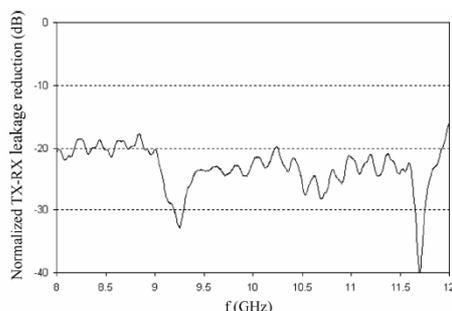


Fig. 8. Medida da redução da interferência TX/RX (configuração banda X).

Para quantificar a medida da redução do sinal TX no percurso de recepção, a resposta medida foi normalizada da última (utilizando as duas portas de RF do modulador) com relação à primeira (utilizando apenas uma porta de RF do modula-

dor). A Fig. 8 mostra estes resultados, onde se pode verificar uma redução da interferência do sinal TX sobre o percurso de recepção de aproximadamente 20 dB, alcançado em toda a banda.

#### IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Alguns trabalhos recentes, na área de optoeletrônica, foram apresentados com o intuito de mostrar o amadurecimento das técnicas e dispositivos desenvolvidos nesta área visando aplicação em radares e sistema de guerra eletrônica.

Os resultados apresentados na seção II demonstraram que o desempenho obtido na utilização de links ópticos de microondas em sistemas radar atende aos requisitos de ruído de fase necessários a esses sistemas, incorporando vantagens tais como menor sensibilidade a perturbações eletromagnéticas e distância ente antena e unidade fixa de processamento praticamente ilimitada. A seção III apresentou alguns resultados consideráveis na redução da interferência do sinal transmitido sobre o percurso de recepção, característica importantíssima em sistemas cujos níveis dos sinais recebidos são bem fracos, tais como radares e receptores de guerra eletrônica.

Diversos outros trabalhos publicados internacionalmente, tais como geradores optoeletrônicos de forma de onda arbitrária, aplicáveis a radares LPI (*Low Probability of Interception*), com melhorias em relação à largura de banda instantânea e à agilidade em frequência, e analisador óptico para medida da diferença de tempo de chegada de uma frente de onda, aplicável diretamente a receptores passivos de ESM (*Electronic Support Measures*) [6], corroboram com aqueles apresentados neste artigo no sentido de mostrar que a optoeletrônica aplicada a sistemas de microondas tem se revelado um instrumento de melhoria substancial de desempenho, principalmente com relação à faixa dinâmica, relação sinal-ruído e estabilidade de fase.

#### REFERÊNCIAS

- [1] K. Garenaux, T. Merlet, M. Alouini, J.Lopez *et al*, "Recent Breakthroughs in RF Photonics for Radar Systems", *IEEE A&E Systems Magazine*, pp. 3-8, February 2007.
- [2] H. Zmuda and E. Toughlian, "Photonic Aspects of Modern Radar", Artech House, 1994.
- [3] Ph. Duême, M. Schaller, D. Mathoorasing, S. Boucchoule *et al*, "MMIC GaAs Transimpedance Amplifiers for Optoelectronic Applications", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 13-16, 1997.
- [4] K. Garenaux, V. Quet, T. Merlet e O.Maas, "Demonstration of 0 dB Gain Reactively Matched Optical Links for Very High Purity Signal Distribution in S-Band Ground Based Radar Systems", *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, pp. 43-46, September, 2003.
- [5] I. L.Gheorma e G. K. Gopalakrishnan, "RF Photonic Techniques for Same Frequency Simultaneous Duplex Antenna Operation", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, n° 13, pp. 1014-1016, July, 2007.
- [6] S. Tonda-Goldstein, D. Dolfi, A. Monsterleet *et al*, "Optical Signal Processing in Radar Systems", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, n° 2, pp. 847-853, February, 2006.

#### AUTORA

A Capitão-Tenente (EN) Carla de Sousa Martins é Oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha do Brasil, formada em engenharia elétrica, opção sistemas eletrônicos, pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro – RJ, em 1996. Atualmente, realiza mestrado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, área de Microondas e Optoeletrônica, como parte do Programa de Pós-Graduação em Análises Operacionais, ênfase em Guerra Eletrônica.