

# PROJETO DE TRANSMISSOR DE RADAR UWB

Uma abordagem prática no projeto de circuitos de  
micro-ondas com tecnologia CMOS e planar



**Laboratório Maxwell**  
Micro-ondas e Eletromagnetismo Aplicado

**De Oliveira, A. M.**

De Oliveira, A. M.

# **PROJETO DE TRANSMISSOR DE RADAR UWB**

Uma abordagem prática no projeto de circuitos de  
micro-ondas com tecnologia CMOS e planar

**São Paulo / SP**

**ArteSam**

**2016**

Este livro é a compilação da Dissertação de Mestrado do Dr. Alexandre Maniçoba de Oliveira, apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

#### Catálogo na publicação

---

, A. M. De Oliveira, Dr.

PROJETO DE TRANSMISSOR DE RADAR UWB Uma abordagem prática no projeto de circuitos de micro-ondas com tecnologia CMOS e planar / A. M. D. O. – São Paulo: CDA, 2016.

178 p.

ISBN 978-85-471-0059-9

1. Engenharia Elétrica. 2. Radar UWB. Eletromagnetismo Aplicado. 3. Antena Vivaldi. 4. Circuitos CMOS.

---

De Oliveira, A. M.

# **PROJETO DE TRANSMISSOR DE RADAR UWB**

Uma abordagem prática no projeto de circuitos de  
micro-ondas com tecnologia CMOS e planar

Uma publicação do:



## **Laboratório Maxwell**

Micro-ondas e Eletromagnetismo Aplicado

Instituto Federal de São Paulo | Campus Suzano

Avenida Mogi das Cruzes, 1501, Suzano, SP, CEP 08673-010

Bloco A, Sala A108, 11. 2146-1809

**Impresso no Brasil**

[www.labmax.org](http://www.labmax.org)

ISBN 978-85-471-0059-9

Copyright © 2016 by Alexandre Maniçoba de Oliveira

1ª Edição – abril de 2016

**Capa / Autoria:**

A. M. De Oliveira, Dr.

**Editor:**

ArteSam

**São Paulo / SP**

**ArteSam**

**2016**

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo amor demonstrado a toda humanidade, por dar-me a vida e sua manutenção.

A meus orientadores e pais acadêmicos, Prof. Dr. Sérgio Takeo Kofuji e Prof. Dr. João Francisco Justo Filho pelo apoio incondicional, pelo exemplo de virtudes, pela credibilidade a mim depositada, pelo companheirismo, proteção, paciência e acima de tudo generosidade em compartilhar seus imensuráveis conhecimentos.

Ao Laboratório de Sistemas Integráveis, nas pessoas dos professores Doutores João Antonio Zuffo e Wilhelmus M. van Noije, pela acolhida àquele maravilhoso ambiente de trabalho.

Ao Laboratório de Microeletrônica, na pessoa de sua Coordenadora Geral, a professora Doutora Inés Pereyra, pelo agradável ambiente de trabalho e pela acolhida.

Ao Prof. Dr. Wilhelmus M. van Noije por todo apoio e revisões dos circuitos CMOS apresentados neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcelo B. Perotoni por toda revisão e apoio no desenvolvimento adjacente aos assuntos de micro-ondas e antenas.

Aos colegas do Grupo de Sistemas Pervasivos e de Alto Desempenho, pelo suporte, apoio e amizade a mim dedicada.

A meus pais Francisco Saldanha e Amélia Ana pelo apoio incondicional e financeiro, sobretudo nos momentos mais difíceis onde me carregaram no colo.

De Oliveira, A. M.

A minhas irmãs Ingrid Danilla e Ursula Anne pelo carinho, torcida e apoio.

A minha esposa Valéria pela paciência, companheirismo e esperança transmitida.

A meu pequeno príncipe, Felipe, pelos momentos em que me deu força e inspiração.

Ao prof. Dr. Etienne Sicard do Dept. of Electrical & Computer Engineering INSA Toulouse - FR, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, sobretudo na forma de uma licença de uso e suporte a ferramenta Microwind, ao senhor meu *merci beaucoup*.

A Dra. Magda Lahorgue Nunes, Coordenadora do programa de pós-graduação em Medicina e Ciências da Saúde da PUCRS, uma autoridade sobre os estudos relacionados à síndrome da morte súbita do lactante, pelo cordial suporte e orientação.

A Fundação Educacional e Cultural de Praia Grande, na pessoa de sua respeitável presidente, Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina Rossi Paula e seus Curadores, Pe. Thomas e Dr. Cabral, por dar-me tanto apoio, sobretudo nos primeiros passos da minha vida acadêmica.

A secretaria acadêmica da Pós-graduação da Engenharia Elétrica da EPUSP nas pessoas Sr<sup>a</sup>. Claudia Cristina Marcelino, Sr<sup>a</sup>. Simone dos Santos e ao Sr. Marcelo Vantini por toda presteza e cordialidade que lhe são marca de excelência na qualidade daquele departamento.

Àqueles que anonimamente trabalharam para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Àqueles que trabalharam no contrafluxo do desenvolvimento deste trabalho, pelo inconsciente e importante incentivo que me deram.

A meus queridos alunos, por todas as palavras de força e pela torcida. Vocês motivam a busca incansável pelo conhecimento.

E em especial a todo corpo docente da Escola Politécnica da USP que participou de minha formação acadêmica e humana, com muito profissionalismo e competência, a eles um especial muito obrigado.

*“Eu creio em mim mesmo. Creio nos que trabalham comigo, creio nos meus amigos e creio na minha família. Creio que Deus me emprestará tudo que necessito para triunfar, contanto que eu me esforce para alcançar com meios lícitos e honestos. Creio nas orações e nunca fecharei meus olhos para dormir, sem pedir antes a devida orientação a fim de ser paciente com os outros e tolerante com os que não acreditam no que eu acredito. Creio que o triunfo é resultado de esforço inteligente, que não depende da sorte, da magia, de amigos, companheiros duvidosos ou de meu chefe. Creio que tirarei da vida exatamente o que nela colocar. Serei cauteloso quando tratar os outros, como quero que eles sejam comigo. Não caluniarei aqueles que não gosto. Não diminuirei meu trabalho por ver que os outros o fazem. Prestarei o melhor serviço de que sou capaz, porque jurei a mim mesmo triunfar na vida, e sei que o triunfo é sempre resultado do esforço consciente e eficaz. Finalmente, perdorei os que me ofendem, porque compreendo que às vezes ofendo os outros e necessito de perdão”.*

**Mahatma Gandhi.**

## APRESENTAÇÃO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo conceitual de um sistema transmissor de pulsos eletromagnéticos de banda ultra-larga, capaz de realizar o controle da formação do feixe irradiado de forma totalmente eletrônica. Para isso, é proposto um sistema formado por quatro canais iguais e independentes, sendo que cada um é formado por um controlador de atraso programável, com o qual se pode ajustar a defasagem temporal entre os pulsos de cada canal, um gerador de pulso, capaz de sintetizar a quinta derivada do pulso Gaussiano a partir de uma nova proposta de topologia, e um arranjo de antenas do tipo planar de abertura exponencial conhecida como antena Vivaldi. O sistema proposto é apoiado por modelos matemáticos e simulações elétricas post-layout com variação dos parâmetros por Monte Carlo com os programas LTSpice 4 e Microwind 2.6, utilizando as regras de processo padrão CMOS 180nm e eletromagnética tridimensional com o uso do programa CST Microwave 2011. Os resultados obtidos nas simulações, comparados com propostas anteriores, indicam que realmente houve o controle da formação do feixe irradiado cujo lóbulo principal teve uma magnitude média de 11dBi com uma largura angular do feixe de  $33^\circ \times 38^\circ$  e possibilidade de variar os ângulos azimutal e de elevação de  $-15^\circ$  a  $9^\circ$  e  $-18^\circ$  a  $6^\circ$ , respectivamente, para uma

De Oliveira, A. M.

frequência central de 6GHz. O pulso utilizado para estimular as antenas foi o pulso Gaussiano em sua quinta ordem de derivação, que teve como resultados médios de simulação uma amplitude de 90mVpp, uma largura de pulso de 370ps a uma taxa de repetição de 100MHz e uma frequência central de 6GHz.

**PALAVRAS-CHAVES:** UWB, RFIC, Timed-Array, Arranjo temporizado, Vivaldi, CMOS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de possíveis cenários de aplicações de radar UWB. (a) Monitoramento de motoristas e pilotos. (b) Monitoramento de pacientes em hospitais. (c) Monitoramento de berços infantis. (ZITO <i>et al.</i> 2011). .....	45
Figura 2 - Diagrama do circuito do gerador de pulso UWB proposto por Kim <i>et al.</i> (2010). .....	51
Figura 3 - Uso da tecnologia UWB para transmissão de vídeo o de aplicações médicas (AYAR, 2010). .....	52
Figura 4 - Monitor Samsung C27A750 recebendo imagens de um Samsung Galaxy Tab através do uso da tecnologia UWB (KENNEMER, 2012). .....	52
Figura 5 - Plataforma de desenvolvimento de Radar UWB P400 da Time Domain com duas antenas Planares (TIME DOMAIN, 2012) .....	53
Figura 6 - Máscara da FCC para aplicações UWB móveis e fixas internas (indoor) e móveis externas (outdoor) (FCC, 2002). .....	58

Figura 7 - Três pulsos candidatos a aplicações UWB. (a) Pulso Sinc; (b) Pulso de onda quadrada; (c) Pulso Gaussiano (WENTZLOFF, 2007).....	60
Figura 8 - Pulso Gaussiano. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (ORNDORFF, 2004). .....	62
Figura 9 - Pulso Gaussiano de 1ª ordem de derivação. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (SHENG, 2003; CHANG, 2005).....	63
Figura 10 - (a) Níveis de emissão do (b) pulso Gaussiano derivado em 1ª ordem com vários valores de largura de pulso (SHENG <i>et al.</i> , 2003). .....	64
Figura 11 - Pulso Gaussiano de 2ª ordem de derivação. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (SHENG, 2003; CHANG, 2005).....	65
Figura 12 - Pulso Gaussiano de 3ª ordem de derivação. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (SHENG, 2003; CHANG, 2005).....	65
Figura 13 - Pulso Gaussiano de 4ª ordem de derivação. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (SHENG, 2003; CHANG, 2005).....	66

Figura 14 - Pulso Gaussiano de 5ª ordem de derivação. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (SHENG, 2003; CHANG, 2005).	67
Figura 15 - Pulso Gaussiano de 6ª ordem de derivação. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (SHENG, 2003).	68
Figura 16 - Pulso Gaussiano de 7ª ordem de derivação. (a) Nível de emissão do pulso; (b) Pulso no domínio do tempo (SHENG, 2003; EL-GABALY, 2011).	68
Figura 17 - Níveis de emissão das diversas ordens de derivação do pulso Gaussiano (SHENG <i>et al.</i> , 2003).	69
Figura 18 - Sistema <i>Beamforming</i> de n-canais. (a) Diagrama. (b) Detalhe do ângulo (ZHAO, 2009).	72
Figura 19 - Ilustração da linearização de um transistor NMOS com base nos parâmetros extraídos do layout para um modelo linear. (a) Vista 3D do transistor. (b) Esquema elétrico do transistor. (c) Modelo linear (KIM, 2012).	75
Figura 20 - Mapeamento das matrizes A, x e b e sua respectiva relação (KIM, 2012).	76
Figura 21- Discretização do domínio do problema eletromagnético em malhas ortogonais (CST, 2011; WEILAND, 1996).	81

Figura 22 - Ilustração das etapas de aplicação das equações de Maxwell nas faces do hexaedro (CST, 2011; WEILAND, 1996).  
..... 81

Figura 23 - Ilustração da aplicação do método *leap-frog* para cálculo dos potenciais elétricos e fluxos magnéticos no domínio do tempo (CST, 2011). ..... 85

Figura 24 - Comparação ilustrativa entre radar de varredura mecânica convencional (a) e o radar de varredura eletrônica (d) proposto neste trabalho. Observa-se que, diferentemente dos pulsos sincronizados do radar convencional (b), os pulsos do radar por varredura eletrônica (e) são defasados o que gera a diretividade do lóbulo principal sem a necessidade de movimento da antena e pode ser visto nos diagramas de radiação (c) e (f) respectivamente. .... 88

Figura 25 - Rede **RC** de primeira ordem (RABAEY, CHANDRAKASAN, NIKOLIC, 2002). ..... 90

Figura 26 - Inversor estático sendo (a) seu símbolo, (b) esquema elétrico com os dois transistores complementares e a capacitância do nó de saída ( $C_L$ ) e modelo com chave do comportamento dinâmico do inversor estático com  $V_{in}=0$  em (c) e  $V_{in}=V_{dd}$  em (d) (RABAEY, CHANDRAKASAN, NIKOLIC, 2002). ..... 91

Figura 27 - Diagrama de um elemento básico de atraso formado pelo inversor estático. (a) Ajuste do tempo pela variação da resistência, (b) da capacitância e (c) ambos.....	93
Figura 28 - Elemento de atraso formado por dois inversores estáticos (a) e suas respectivas formas de ondas ilustradas (b).	94
Figura 29 - Elemento de atraso variável formado por dois inversores estáticos (a) e suas respectivas formas de ondas ilustradas (b). .....	95
Figura 30 - (a) Controlador de atraso programável de 4 bits, o (b) detalhe esquemático do capacitor variável e (c) símbolo do PDC proposto (DE OLIVEIRA; ASCAMA; VAN NOIJE; KOFUJI; MOREIRA, 2012).....	96
Figura 31 - Topologia do gerador de pulso Gaussiano de 5ª Ordem de derivação proposto por (KIM <i>et al.</i> , 2004; KIM <i>et al.</i> , 2010).....	97
Figura 32 - Topologia do Gerador de pulso Gaussiano de 5ª Ordem de derivação proposto por (Bo <i>et al.</i> , 2009a, 2009b)....	99
Figura 33 - Circuitos de cada bloco. A primeira coluna apresenta a(s) referência(s) que utiliza(m) o bloco, a primeira linha apresenta os blocos, a segunda coluna refere-se ao circuito conformador de onda quadrada, da terceira à sexta coluna	

apresentam-se os vários geradores de pulso e a última coluna apresenta o estágio de saída. ....	100
Figura 34 - Topologia do novo gerador de pulso Gaussiano de 5ª ordem de derivação proposto (DE OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2012b,c) .....	102
Figura 35 - Formador de onda quadrada. (a) Bloco do subsistema. (b) Bloco lógico. (c) Circuito CMOS. (d) Layout. (KIM <i>et al.</i> , 2004; DE OLIVEIRA <i>et al.</i> 2012b,c) .....	103
Figura 36 - Janela de configuração dos parâmetros de simulação do programa Microwind com o detalhe dos parâmetros de modelo MOS Empírico nível 3, variação de parâmetros de processo por Monte Carlo, adição de ruído no sinal de entrada de 100mV e detalhe de parte do arquivo netlist com a extração dos parâmetros. ....	104
Figura 37 - Forma de onda do sinal de entrada do bloco formador de onda quadrada ( $v_{ent.}$ ) que passa pelo primeiro inversor estático ( $v_{ent. inv.}$ ) e sai pelo segundo inversor estático ( $v_{qua.}$ ) (DE OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2012b). ....	106
Figura 38 - Gerador de pulso triangular. (a) Bloco do gerador de pulso triangular. (b) Circuito do gerador de pulso triangular. (c) Circuito da porta $E$ estática. (d) Formas de onda do circuito gerador de onda triangular sendo a forma de onda quadrada	

( $v_{qua.}$ ), a onda interna do gerador no nó $x$ entre o dreno do transistor $M4n$ e o <i>gate</i> do transistor $M10n$ ( $v_x$ ) e o pulso triangular de saída ( $v_{pulso}$ ) (RABAEY; CHANDRAKASAN; NIKOLIC, 2002; ZHANG <i>et al.</i> , 2007).....	107
Figura 39 - Circuito de atraso fixo. (a) Bloco de atraso fixo. (b) Circuito lógico do atraso fixo. (c) Esquema elétrico do atraso fixo. (d) Parte do <i>layout</i> do gerador de pulso onde há em detalhe os três inversores que formam o atraso fixo. ....	110
Figura 40- Estágio de saída. (a) Bloco do estágio de saída. (b) Esquema elétrico do circuito do estágio de saída. (c) Parte do <i>layout</i> do gerador de pulso com o detalhe do estágio de saída. ....	111
Figura 41- <i>Layout</i> do circuito gerador de pulso UWB de 5ª ordem de derivação. ....	113
Figura 42 - <i>Layout</i> do circuito gerador de pulso UWB proposto com os Pads. ....	113
Figura 43 - Novo gerador de pulso UWB de 5ª ordem de derivação Gaussiana proposto. (a) Formador de onda quadrada. (b) Gerador de pulso triangular. (c) Linha de atraso fixo. (d) Estágio de saída. (e) Antena (Carga). (f) Diagrama de tempo simplificado. ....	114