

Amaury Salgado Ferreira

ASSINATURA ELETROMAGNÉTICA DE ESTRUTURAS PLANARES  
POR TDR - TIME DOMAIN REFLECTOMETRY: ANÁLISE  
QUALITATIVA E QUANTITATIVA.

Campinas  
2013

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Amaury Salgado Ferreira

ASSINATURA ELETROMAGNÉTICA DE ESTRUTURAS PLANARES POR TDR - TIME DOMAIN  
REFLECTOMETRY: ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA.

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade  
de Engenharia Elétrica e de Computação como  
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de  
concentração: Telecomunicações.

Orientador: Luiz Carlos Kretly

Campinas  
2013

# Resumo

# Abstract

# Lista de Figuras

1.1	Coplanar waveguide . . . . .	5
1.2	Conductor-backed coplanar waveguide . . . . .	5
1.3	Microstrip . . . . .	8

# Lista de Abreviaturas

CPS	- <i>Coplanar Strip</i>
CPW	- <i>Coplanar Waveguides</i>
MEMS	- <i>Microelectromechanical System</i>
MICs	- <i>Microwave Integrated Circuits</i>
MMICs	- <i>Monolithic Microwave Integrated Circuits</i>
RF	- <i>Radio Frequência</i>
TDR	- <i>Time Domain Reflectometry</i>
VNA	- <i>Vector Network Analyzer</i>

# Sumário

<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>1 Estruturas Planares de Transmissão</b>	<b>3</b>
1.1 Tipos de Estruturas Planares . . . . .	4
1.1.1 Coplanar Waveguides (CPW) . . . . .	4
1.1.2 Microstrip . . . . .	7
1.2 Aplicações de Estruturas Planares . . . . .	9
1.3 Resumo do Capítulo . . . . .	9
<b>Bibliografia</b>	<b>10</b>

# Introdução

O setor de telecomunicações com o passar do tempo sempre demandou de melhorias em sua rede para **pode** atender às necessidades de seus usuários, **com** isso de tempos em tempos novas tecnologias são criadas para poder atender a essa demanda, e com essas novas tecnologias novos **hardwares** são desenvolvidos da mesma forma. Geralmente quando novas tecnologias são criadas no setor de transmissão *wireless*, elas buscam uma maior largura de banda e, as vezes, as utilização de novas faixas do espectro de frequências.

Em todo e qualquer sistema *wireless*, como: **wifi, bluetooth**, telefonia móvel entre outros, o uso de antenas é indispensável uma vez que esta é a responsável por enviar e receber os dados **que estão sendo transmitidos**. Toda e qualquer antena é desenvolvida visando atender a determinadas características do sistema em que serão usadas, dentre elas estão a frequência de operação e a largura de banda, além disso também devem atender às características físicas do dispositivo onde a antena será instalada, o que ~~para~~ para dispositivos móveis geralmente é um espaço reduzido. Para atender a essas necessidades uma alternativa bastante utilizada são as antenas **patch**.

As antenas **patch**, ou planares, aparecem como uma boa alternativa para ~~para~~ dispositivos móveis por ocuparem pouco espaço, serem leves, possuírem uma boa largura de banda, **podem operar em mais de uma banda e em frequências mais altas**. Tais antenas têm sido muito utilizadas em telefonias móveis, que constantemente passam por melhorias e constantemente necessitam de novas antenas que atendam às especificações de cada tecnologia. **Cada designer na hora de projetar uma antena escolhe um modelo de antena e modifica-o ou então propõe um novo modelo**, independente da alternativa utilizada a antena projetada precisa estar casada com o sistema **quem que** ela irá ser utilizada, o que muitas vezes não é **possível** o que faz necessário a utilização de circuitos de casamento. Uma maneira para se verificar a impedância de sistemas é conhecida com TDR.

TDR é um método bastante utilizado para a aquisição das **características físicas dos sistemas medidos no domínio do tempo**. Essa técnica possibilita a aquisição de dados como: **tamanho do sistema, impedância, capacitância, indutância** e localização pontos de descontinuidade. **Recentemente, tem sido utilizada para a caracterização de antenas, como uma alternativa mais viável que as medições utilizando VNA, que necessitam da estrutura de uma câmara anecoica para a realização de medidas.**



---

# Objetivos

alternativa na  
avaliação....

O objetivo principal do trabalho é a utilização do método TDR em estruturas planares, e mostrar ~~que~~ a resposta obtida ~~pelo~~ método é passível de ser utilizada como uma forma avaliação de estruturas, tanto na sua utilização como um teste de validação de fabricação, como na avaliação de possíveis possíveis falhas que tenham ocorrido durante ao processo de produção. Além disso objetiva-se também, fornecer de forma simples uma coleção de estruturas com seus respectivos sinais de resposta, afim de auxiliar na análise de uma estrutura mais complexa.

## Organização do Trabalho

Este trabalho de dissertação está organizado em 5 capítulos da seguinte maneira: o Capítulo 1 possui uma introdução teórica sobre ~~o que são~~ estruturas planares, como podem ser projetadas e onde podem ser aplicadas. O Capítulo 2 faz a introdução sobre o método TDR, a forma como o método trabalha, quais são as respostas típicas para determinados circuitos, além do conhecimento matemático sobre o método desenvolvido até o momento. o Capítulo 3 faz referências a algumas formas de assinaturas que existem, e como elas podem ser utilizadas. O Capítulo 4 ilustra a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho trabalho. Por fim, o Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no trabalho.

# Capítulo 1

## Estruturas Planares de Transmissão

Muitos meios podem ser utilizados para a realização da transmissão de sinais, tais como: cabos coaxiais, fibras, o ar entre outros, que dependo da aplicação em que se está trabalhando um desses meios será o mais adequado. Cabos coaxiais por exemplo são muito utilizados na telefonia para a criação de redes telefônicas, entretanto, devido as suas características físicas seu uso acaba limitado para algumas aplicações, como por exemplo quando há a necessidades de transmissão de um alto volume de dados. As fibras ópticas possibilitam uma alta velocidade de transmissão, ou seja, possibilitam a transmissão de um alto volume de dados em um curto espaço de tempo, e é muito utilizada para transmissões de longas e médias distâncias, porém, para médias distâncias a utilização desse tipo de transmissão necessita de um estudo prévio para analisar a viabilidade da utilização de fibras, uma vez que os custos envolvendo essa tecnologia são mais elevados do que a de cabos coaxiais. O ar por sua vez é utilizado em aplicações que necessitam da transmissão de informações sem a utilização de cabos, tecnologia conhecida como *wireless*. Atualmente essa forma de propagação já é muito utilizada, exemplos clássicos que podemos citar são: rádio difusão, redes de telefonia móvel, redes *wi-fi*, *bluetooth*, entre outras.

Tecnologias que dependem da transmissão via ar fazem uso do espectro eletromagnético e cada tecnologia tem um padrão adotado que utiliza determinada faixa do espectro, os sinais de rádio e televisão utilizam faixas que vão até 900MHz, os padrões de redes Wi-Fi IEEE 802.11(b/n/g) utilizam as faixas 2.3 - 2.4 GHz e 4.9 - 5.9GHz, por exemplo. Para cada tipo faixa de espectro uma tecnologia é adotada para a realização da transmissão de sinais, e no caso das micro-ondas as linhas de transmissões planares são as mais utilizadas.

As estruturas planares de transmissão fazem referências às linhas de transmissão que consistem em tiras condutoras que são impressas na superfície dos substratos das linhas de transmissão. Essas estruturas são a base para circuitos integrados de micro-ondas (MICs), e representam um tópico de pesquisa importante e interessante para muitos engenheiros de micro-ondas. Junto com os avanços em MICs e linhas planares de transmissão, muitos métodos analíticos pra estruturas passivas de micro-ondas e ondas milimétricas, em geral, e linhas planares de transmissão

em específico, tem sido desenvolvidos pela necessidade de análise e design mais precisos para os dispositivos MICs. Esses métodos analíticos **tem** ajudados na investigação de desenvolvimento de novas linhas de transmissão planares. [Nguyen [2001]]

**Linhas planares são utilizadas para a geração de diversas formas de estruturas, como:** antenas, **ballons**, filtros, acopladores ou utilizadas simplesmente para o transporte de sinais. Entre as linhas de transmissão, circuitos impressos, um exemplo de linhas de transmissão planar, são muito úteis na eletrônica moderna. Existem diversos tipos de **estruturas planares**, como: *coplanar waveguides* (CPW), *coplanar strip* (CPS), *strip lines*, *slot lines* e a *microstrip*. Dentre todos os tipos de estruturas planares, a *microstrip* é a mais conhecida e comumente usada linha de transmissão planar e foi desenvolvida pelo *ITT Federal Telecommunications Laboratories* em Nutley - Nova Jersey, e publicada por Greig e Engelmann em 1952 [Grieg and Engelmann [1952]].

### 1.1 Tipos de Estruturas Planares

Como já mencionado, vários são as formas de transmissões. Cada tipo de estrutura possui características distintas, tais características são levadas em consideração na escolha de qual tipo será utilizada para cada tipo de aplicação. As principais características estão a frequência de operação, o espaço necessário para a estrutura, a facilidade de fabricação, entre outros pontos que precisam ser analisados. A tabela 1.1, lista alguns tipos de estruturas planares com algumas dessas características.

A teoria descrita aqui está correta, mas é uma teoria muito disseminada. Eu tiraria (se puser, no máximo no apêndice). Veja o capítulo 1 da minha tese. Acho mais interessante daquele modo.

Tabela 1.1: Propriedades de linhas planares de transmissão [Nguyen [2001]]

Tipos	Frequência de Operação	Dimensão	Perda	Baixo Custo de Produção
Microstrip	$\leq 110$ GHz	Pequeno	Alta	Bom
Strip line	$\leq 60$ GHz	Médio	baixa	Bom
Slot line	$\leq 110$ GHz	Pequena	Alta	Bom
Coplanar waveguides	$\leq 110$ GHz	Pequeno	Alta	Bom

A seguir são explorados alguns modelos de estruturas planares abordando algumas de suas características e que aplicações ~~onde~~ cada tipo de estrutura é utilizada, dando ênfase maior para a *microstrip* que é o foco principal da pesquisa.

#### 1.1.1 Coplanar Waveguides (CPW)

**Coplanar waveguides** são um tipo de linha de transmissão planar utilizados em MICs assim como em *monolithic* MICs (MMICs). A característica principal dessas linhas de transmissão é sua construção uniplanar, ou seja, todos os condutores estão no mesmo lado do substrato. Essa

característica facilita a fabricação e permite uma caracterização rápida e econômica utilizando técnicas em wafer.

A CPW foi proposta por C. P. Wen em 1969 que consistia de um substrato dielétrico com condutores na superfície. Os condutores formam uma tira separada por um pequeno espaço entre dois planos de terra, um de cada lado. As dimensões da tira, do espaçamento entre os planos de terra, a espessura e a permissividade do substrato dielétrico determinam a constante dielétrica efetiva ( $\epsilon_{eff}$ ), a impedância característica ( $Z_0$ ) e a atenuação ( $\alpha$ ) da linha. Essa estrutura básica passou a ser conhecida como CPW convencional (figura 1.1) [Simons [2001]]

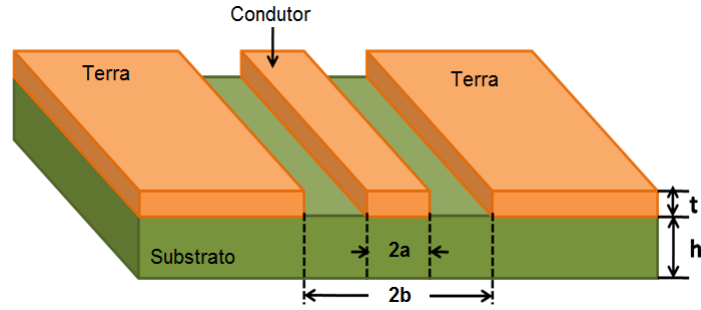


Figura 1.1: Coplanar waveguide

Além da estrutura convencional também existem outras formas de CPW que possuem características um pouco diferentes entre elas está o *conductor-backed* CPW, ilustrado na figura 1.2.

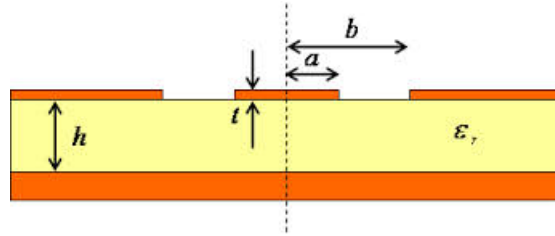


Figura 1.2: Conductor-backed coplanar waveguide

As fórmulas utilizadas hoje para a aquisição dos valores de  $\epsilon_{eff}$  e  $Z_0$  das estruturas foram derivadas através de métodos de mapeamento conforme (*conformal-mapping*), levando em consideração linhas com espessura zero, e são mostradas a seguir.

Para estruturas coplanares convencionais, segundo [Ghione and Naldi, 1984] temos que:

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{\epsilon - 1}{2} \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \quad (1.1)$$

e

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{K(k')}{K(k)} \quad (1.2)$$

onde

$$k = \frac{a}{b} \quad (1.3)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (1.4)$$

$$k_1 = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \quad (1.5)$$

$$k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (1.6)$$

onde  $K(k)$  é a integral elíptica completa de primeira ordem, e seus valores podem ser determinados através da integral ou de através de tabelas.

Devido a importância da integral elíptica de primeira ordem para a análise de vários tipos de linhas de transmissões planares, as equações aproximadas a seguir podem ser utilizadas para o cálculo. [Hoffmann [1987]]

Para  $0 \leq k \leq 0.71$  temos:

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \frac{2k^2}{8} + \frac{9k^2}{8^2} + 50 \left( \frac{k^2}{8} \right)^2 + 306.250 \left( \frac{k^2}{8} \right)^4 + \dots \right\} \quad (1.7)$$

e para  $0.71 < k \leq 1$

$$K(k) = p + \{p - 1\} \left( \frac{k'^2}{4} \right) + 9 \left\{ p - \frac{7}{6} \right\} \left( \frac{k'^4}{64} \right) + 25 \left\{ p - \frac{37}{30} \right\} \left( \frac{k'^6}{256} \right) + \dots \quad (1.8)$$

$$p = \ln\left(\frac{4}{k'}\right) = \ln\left(\frac{4}{\sqrt{1 - k^2}}\right) \quad (1.9)$$

O máximo erro relativo das equações 1.7 e 1.8 ocorre o ponto limite  $k = \sqrt{0.5} \simeq 0.71$  e é de 3%. Para  $k \rightarrow 0$  ou  $k \rightarrow 1$ , o erro relativo em 1.7, 1.8 e 1.9, respectivamente, vão para zero.

Equações simples para a relação  $K(k')/K(k)$  usam projeção estereográfica, definidas por Hilberg, e, para  $0 < k \leq 0.173$  ou  $2 \leq K(k')/K(k) < \infty$ , temos as seguintes equações[Hoffmann [1987]].

$$\frac{K(k')}{K(k)} = \left( \frac{4}{\pi} \right) \ln \left( \frac{2}{\sqrt{k}} \right) \quad (1.10)$$

$$k = 4 \exp \left\{ -\frac{\pi K(k')}{2K(k)} \right\} \quad (1.11)$$

e para  $0.173 < k \leq 1$  ou  $0 \leq K(k')/K(k) < 2$ , temos:

$$\frac{K(k')}{K(k)} = \frac{\pi}{\ln(2) + 2\arctan(\sqrt{k})} \quad (1.12)$$

$$k = \left[ \tanh \left\{ \frac{\pi K(k)}{2K(k') - \frac{\ln(2)}{2}} \right\} \right]^2 \quad (1.13)$$

O erro relativo para as equações 1.10 e 1.12 é menor que 0.24%. A função  $K(k')/K(k)$  tende a um valor infinito quando  $k = 0$ , e cai monotonicamente com  $k$ , chegando a zero quando  $k = 1$ .

A definição completa das integrais elípticas de primeira ordem podem ser encontradas em [Fletcher [1948]] e [Byrd and Friedman [1971]], Assim como, os resultados também podem ser encontrados já tabelados, como em [Jahnke [1945]]

Quando é levado em consideração a espessura dos condutores, a constante dielétrica efetiva e a impedância característica pode ser calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon_{eff}(t) = \varepsilon_{eff} - \frac{0.7(\varepsilon_{eff} - 1) \frac{t}{b-a}}{\frac{K(k)}{K(k')} + 0.7 \frac{t}{b-a}} \quad (1.14)$$

e

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}(t)}} \frac{K(k'_e)}{K(k_e)} \quad (1.15)$$

onde

$$k_e = \frac{S_e}{S_e + 2W_e} \quad (1.16)$$

$$k'_e = \sqrt{1 - k_e^2} \quad (1.17)$$

$$S_e = 2a + \Delta \quad (1.18)$$

$$W_e = b - a - \Delta \quad (1.19)$$

$$\Delta = \frac{1.25t}{\pi} \left[ 1 + \left( \frac{8\pi a}{t} \right) \right] \quad (1.20)$$

### 1.1.2 Microstrip

Microstrip é uma das formas de estruturas planares mais conhecidas e que é utilizada em diversas aplicações, como antenas e linhas de transmissão dispositivos que trabalhem com RF, principalmente na faixa de ondas milimétricas. Dentre as aplicações de RF mais comuns são as antenas patch, e isso é devido as algumas características que essas estruturas planares possuem, das quais podemos destacar as seguintes:

- Pequena área de ocupação;
- Estrutura leve;

- Facilidade de fabricação;
- Facilidade de alimentação;
- Facilidade para usar em estruturas de array ou em acoplar a outros circuitos microstrip;
- Pode assumir qualquer tipo de formato.
- Suporta mais de uma frequência de operação.

Porém nem sempre todas as características desse tipo de antenas são vantagens, existem alguns pontos que devem ser levados em consideração, como por exemplo a largura de banda que essas estruturas alcançam, mas que podem ser aumentadas com a utilização de algumas técnicas, ou, por exemplo, quando há a necessidade de isolamento do circuito, nesse caso a proteção externa precisa ser considerada.

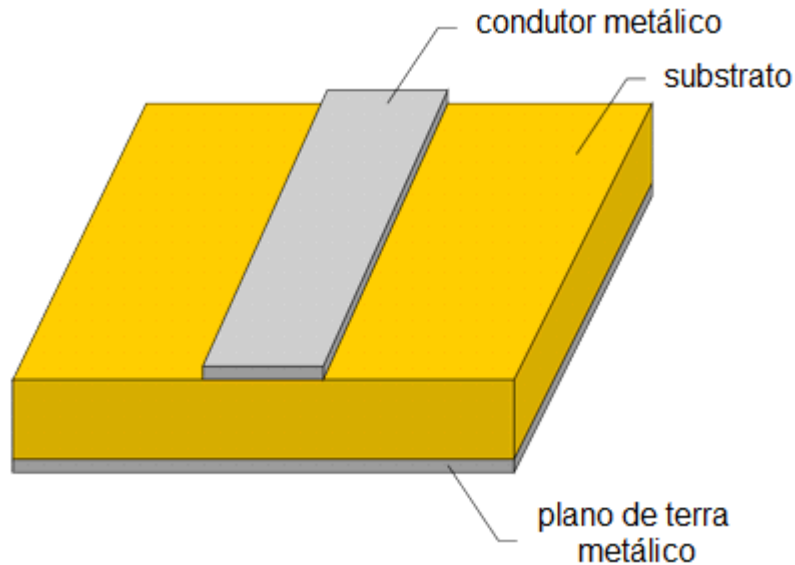


Figura 1.3: Microstrip

As estruturas microstrip são linhas de transmissão geométricas por uma linha condutora simples um dos lados de um substrato dielétrico e um plano de terra simples no lado oposto, como mostrado na figura 1.3. Como se trata de uma estrutura aberta, as linhas microstrip tem uma grande vantagem na fabricação comparada com outras estruturas, assim como facilidades para ajustes e interconexões [Maloratsky [2000]]

A formulas para o cálculo da constante dielétrica efetiva e da impedância característica, hoje já são bem consolidadas, e são mostradas a seguir [Bhartia and Rao [1990]]

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{10h}{w} \right)^{-1/2} \quad (1.21)$$

e

$$Z_0 = \frac{42.4}{\sqrt{\varepsilon_r + 1}} \ln \left\{ 1 + \frac{4h}{w} \left[ G + \sqrt{G^2 + \frac{\pi^2}{2} \left( 1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \right)} \right] \right\} \quad (1.22)$$

onde

$$G = \left( \frac{14 + \frac{8}{\varepsilon_r}}{11} \right) \frac{4h}{w} \quad (1.23)$$

## 1.2 Aplicações de Estruturas Planares

Como já mencionado, as linhas de transmissões planares podem ser utilizadas em diversas aplicações devido a suas características físicas, principalmente facilidade de fabricação e integração com outros dispositivos, dentre elas as antenas de micro fita são as mais comuns e são utilizadas nas mais diversas formas de comunicações, em [Patel [2013]] é feito um levantamento de alguns tipos de comunicação que utilizam antenas de micro fita, entre elas estão: comunicações móveis, GPS, identificação em radiofrequência (RFID), radar e WiMAX. Mas além de antenas de microfita as estruturas planares também podem ser utilizadas para fabricação de outros dispositivos como anéis de ressonância [Rohrdantz et al. [2014]], superfícies seletoras de frequências [Webber et al. [2014]], entre outras.

## 1.3 Resumo do Capítulo

Neste Capítulo buscou mostrar algumas formas de estruturas de transmissões planares que podem ser encontradas hoje, assim como fornecer uma base teórica mínima de como uma estrutura planar pode ser projetada, levando em consideração suas dimensões físicas, como largura da linha de transmissão e a espessura dos dielétricos, assim como mostrar algumas aplicações onde tais estruturas são comumente utilizadas.



# Bibliografia

- P. Bhartia and K. V. S. Rao. *Millimeter-Wave Microstrip and Printed Circuit Antennas*. Artech House, 1990.
- Paul F. Byrd and Morris D. Friedman. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists*. Springer, 1971.
- Alan Fletcher. *Guide to Tables of Elliptic Functions*. MTAC, 1948.
- G. Ghione and C. Naldi. Analytical formulas for coplanar lines in hybrid and monolithic mics. *Electronics Letters*, 20(4):179–181, February 1984. ISSN 0013-5194. doi: 10.1049/el:19840120.
- D.D. Grieg and H. F. Engelmann. Microstrip-a new transmission technique for the kilomegacycle range. *Proceedings of the IRE*, 40(12):1644–1650, Dec 1952. ISSN 0096-8390. doi: 10.1109/JRPROC.1952.274144.
- Reinmut k. Hoffmann. *Handbook of Microwave Integrated Circuits*. Artech House, 1987.
- Eugene Jahnke. *Table of functions*. Dover, 1945.
- Leo G. Maloratsky. Reviewing the basics of microstrip lines. *MICROWAVES & RF*, March 2000. URL [http://paginas.fe.up.pt/~hmiranda/etele/microstrip\\_basics.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~hmiranda/etele/microstrip_basics.pdf).
- Cam Nguyen. *Analysis methods for RF, microwave, and millimeter-wave planar transmission line structures*, chapter 1, pages 1–11. John Wiley & Sons, Inc., 2001. ISBN 9780471200673. URL <http://dx.doi.org/10.1002/0471200670>.
- B. D. Patel. Microstrip patch antenna - a historical perspective of the development. *Atlantis Press*, 2013.
- Benjamin Rohrdantz, Vincent Schmidt, and Arne F. Jacob. Microstrip ring resonator based frequency reconfigurable band-pass filters at k-band. *20th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications*, 2014.
- Rainee N. Simons. *Coplanar Waveguides, Circuits, Components and Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.

Maurício Webber, Ernesto Barbin, and Luiz Kretly. Practical guidelines for design and implementations of microwave absorber using fss-frequenc selective surfaces. *20th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications*, 2014.