

# CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS – SENSORES DE PERMISSIVIDADE ELÉTRICA EM FREQUÊNCIAS DE MICRO-ONDAS

Paloma Meneleu de Azara<sup>1</sup>; Eduardo Victor dos Santos Pouzada<sup>3</sup>;  
Thiago Antonio Grandi de Tolosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2,3</sup> Professores da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este trabalho apresenta um estudo da viabilidade da aplicação de algumas técnicas para caracterização da permissividade elétrica complexa de materiais em frequências na faixa de micro-ondas. O trabalho proposto envolve o estudo de possíveis sensores, nos quais a amostra de material sob análise é inserida, e que podem ser de vários tipos e com formas geométricas distintas levando em consideração o estado físico e a densidade do material. Considerando também que o estado da arte dos sensores implica necessariamente em custo elevado, este trabalho pretende quantificar a “imprecisão” dos resultados obtidos por meio de um sensor construído com forma de linha de transmissão coaxial a partir de recursos mecânicos menos sofisticados. O método de transmissão e reflexão foi escolhido e o algoritmo NRW desenvolvido por Nicolson, Ross e Weir foi utilizado para obtenção da permissividade elétrica complexa a partir do módulo e fase dos parâmetros de espalhamento  $S_{11}$  e  $S_{21}$  obtidos a partir de um Analisador Vetorial de Redes. Uma comparação entre os resultados obtidos através de medidas experimentais e por simulação numérica pelo software COMSOL Multiphysics é apresentada para amostras de ar e água destilada. O software MATLAB foi utilizado para efetuar as leituras das medições do Analisador Vetorial de Redes e dos resultados das simulações computacionais realizadas pelo COMSOL, bem como implementar o algoritmo NRW e fornecer os resultados sob forma numérica e gráfica.*

## Introdução

O conhecimento das características constitutivas dos materiais, dentre elas a permissividade elétrica complexa em frequências na faixa de micro-ondas, é muito importante para aplicações industriais como por exemplo em processos de secagem e de aceleração de reações químicas e em aplicações científicas como o estudo da polarização de ondas no meio.

Existem vários métodos descritos na bibliografia que possibilitam essa caracterização, dentre eles, os métodos envolvendo transmissão e reflexão em que uma amostra do material submetida ao teste é inserida em um trecho de linha de transmissão e o cálculo da permissividade elétrica complexa é realizado através de algoritmos que implementam a modelagem e que utilizam os parâmetros complexos de espalhamento – *scattering parameters* – medidos por analisadores vetoriais de rede. Esses métodos, que pertencem a uma categoria de métodos não ressonantes, são implementados para atuar em uma faixa larga de frequências e podem ser utilizados em várias aplicações para caracterização de materiais além do que está proposto no presente trabalho (Chen *et al.*, 2004). Os fatores associados ao método escolhido dependem da natureza do material e do processo de medição considerando a faixa de frequência utilizada e a calibração do equipamento.

Os princípios de funcionamento e aplicações do método de transmissão e reflexão são analisados na bibliografia. Informações detalhadas são apresentadas (Chen *et al.*, 2004), (Pozar, 2005) e (Gupta *et al.*, 1981).

Os artigos apresentados por (Nicolsson e Ross, 1970) e (Weir, 1974), que servem de referência no presente trabalho, são clássicos na literatura e fornecem um procedimento para determinação da permissividade e permeabilidade complexas de materiais para uma ampla

faixa de frequências. Alguns resultados experimentais são apresentados para amostras de teflon, madeira (maple), nylon e Plexiglas na faixa de 0,4 – 9,6 GHz. O sistema de medições com o detalhamento de construção de um *sample holder* coaxial é apresentado no trabalho.

O trabalho proposto por (Baker-Jarvis, Vanzura e Kissick, 1990) apresenta um algoritmo baseado no método de Newton-Raphson que permite corrigir o mal comportamento na determinação da permissividade elétrica, normalmente gerados pelos métodos tradicionais quando aplicados em meios de baixas perdas, em frequências correspondentes à múltiplos inteiros de meio comprimento de onda da amostra fornecida.

A proposta de um método não iterativo aplicado em tamanhos arbitrários de amostras e com aplicação em uma larga faixa de frequências é apresentado por (Boughriet e Legrand, 1997). O trabalho apresenta uma discussão sobre as instabilidades geradas pelo método NRW quando aplicado em meios de baixas perdas e propõe uma formulação diferente para garantir convergência no cálculo da permissividade elétrica.

(Stuchly e Matuszewski, 1978) apresentam uma contribuição importante para os métodos de transmissão e reflexão no que diz respeito ao comprimento da amostra inserida na linha de transmissão.

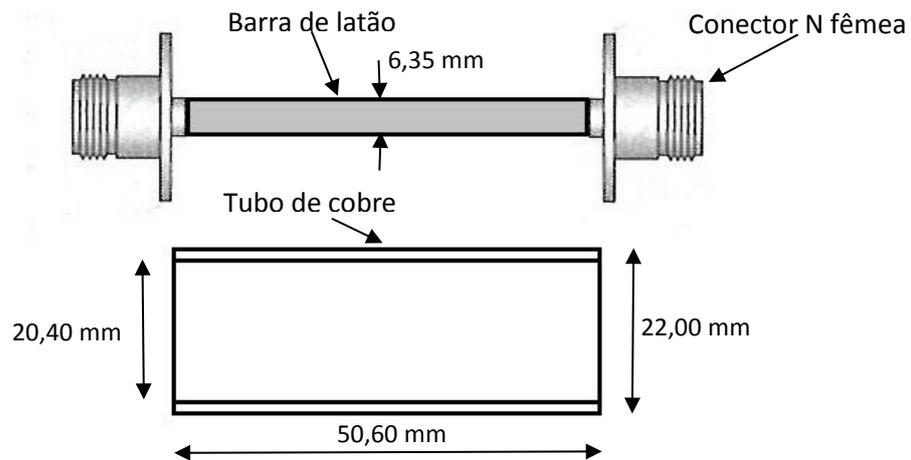
## Material e Métodos

A Figura 1 mostra o sensor construído na forma de linha de transmissão coaxial; na literatura ele é ordinariamente designado por *sample holder*. A estrutura é formada por dois conectores coaxiais tipo N fêmea com flange, por um condutor externo de Cobre e por um condutor central de Latão; ela é inteiramente desmontável para possibilitar a inserção dos materiais a serem caracterizados. As dimensões destacadas na Figura 2 impõem impedância característica  $Z_0 = 69,97 \Omega$  com o sensor vazio. A faixa de frequência de operação em torno de 2,45 GHz é imposta pelo gerador interno ao analisador vetorial de redes – *Vector Network Analyzer* – VNA. este valor decorreu do uso de materiais usuais disponíveis no mercado (barra cilíndrica de latão e um tubo de cobre para tubulação hidráulica aquecida).

Figura 1 – Sensor construído para caracterização dos materiais.

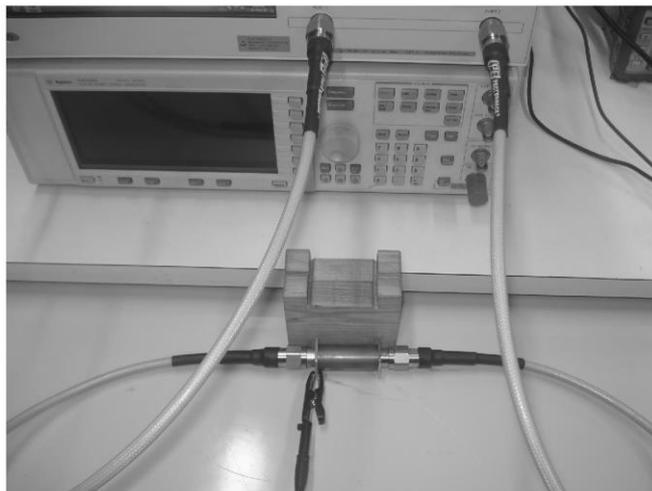


Figura 2 – Desenho com as dimensões do *sample holder*.



O sensor contendo o material a ser analisado foi inserido, por conexão através de cabos coaxiais com impedância característica  $Z_0 = 50 \Omega$ , entre as portas 1 e 2 do VNA modelo E5063A fabricado pela Agilent Technologies como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Montagem para medição dos parâmetros de espalhamento.



Com relação às medições realizadas no trabalho, destacam-se três etapas fundamentais:

1-) Calibração do equipamento para certificação de que as medições dos parâmetros de espalhamento sejam efetuadas corretamente nas seções de acesso do sensor na montagem. O método de calibração empregado foi o *Full 2-Port Calibration* em que os conectores de referência do kit de calibração (curto, aberto, carga casada e de passagem – *through*) foram utilizados para estabelecer condições precisas de operação do equipamento a partir de correções estabelecidas por *software* em relação às referências. O procedimento envolve a medição dos parâmetros complexos (módulo e fase)  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  e  $S_{12}$  em função de frequência devidamente corrigidos para os terminais coaxiais (planos de acesso) dos cabos coaxiais de cada uma das portas evitando assim erros de desvio, erros aleatórios e erros sistemáticos (Agilent, 2014, capítulo 4); 2-) Medição dos parâmetros de espalhamento com o equipamento calibrado e o sensor com a amostra nela inserida operando numa faixa de frequência ajustada; 3-) Cálculo da permissividade elétrica complexa dos materiais sob teste através da implementação do algoritmo NRW.

A partir dos valores medidos de  $S_{11}$  e  $S_{21}$  foi possível a determinação da permissividade relativa do material  $\varepsilon_r$  por (1).

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[ \left( \frac{1}{\lambda_c^2} \right) - \left( \frac{1}{\Lambda^2} \right) \right]} \quad (1)$$

e portanto  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')\varepsilon_0$ .

Em (1),  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa do material,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no espaço livre,  $\lambda_c$  é o comprimento de onda de corte na linha de transmissão, que para a linha coaxial  $\lambda_c \rightarrow \infty$  e  $\Lambda$  é tal que:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[ \frac{1}{2\pi l} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (2)$$

Na equação (2),  $l$  é o comprimento da amostra,  $T$  é o coeficiente de transmissão, dado em função dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  e do coeficiente de reflexão  $\Gamma$ :

$$T = \frac{(S_{11} + S_{21}) - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (3)$$

O coeficiente de reflexão é dado por:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (4)$$

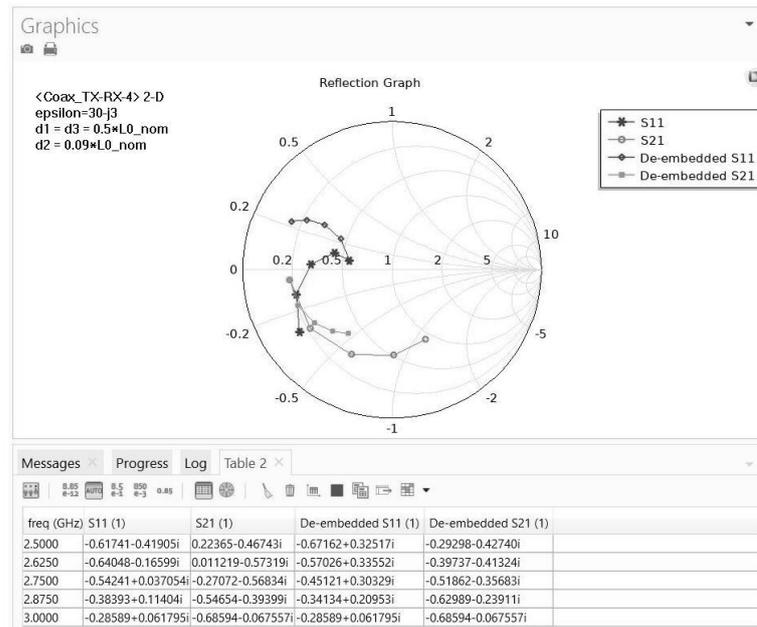
onde  $K = \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2) + 1}{2S_{11}}$ .

As etapas de cálculo destas equações foram realizadas com uso do *software* MATLAB. Foram criados um *script*, denominado <de\_embedded\_4b.m> e três funções, denominadas <nrw\_f2b.m>, <ler\_s2p.m> e <ler\_csv\_mph.m>. A primeira função efetua os cálculos determinados pelo algoritmo NRW; a segunda função provê a leitura dos dados fornecidos pelo VNA; a terceira função provê a leitura de dados fornecidos pelo COMSOL Multiphysics.

## Resultados e Discussão

Inicialmente procurou-se validar a implementação do método NRW por meio de simulações computacionais nas quais as dimensões do *sample holder*, o meio material, as portas de acesso e o intervalo de frequência fossem livremente ajustados. A Figura 4 mostra o resultado dos parâmetros de espalhamento  $S_{11}$  e  $S_{21}$  da simulação realizada usando o Método dos Elementos Finitos com o COMSOL. O comprimento da amostra foi de 8,9938 mm, o meio material apresentava valor de permissividade complexa relativa igual a  $\varepsilon_r = 30 - j3$  e o intervalo de frequência foi compreendido entre 2,50 a 3,00 GHz.

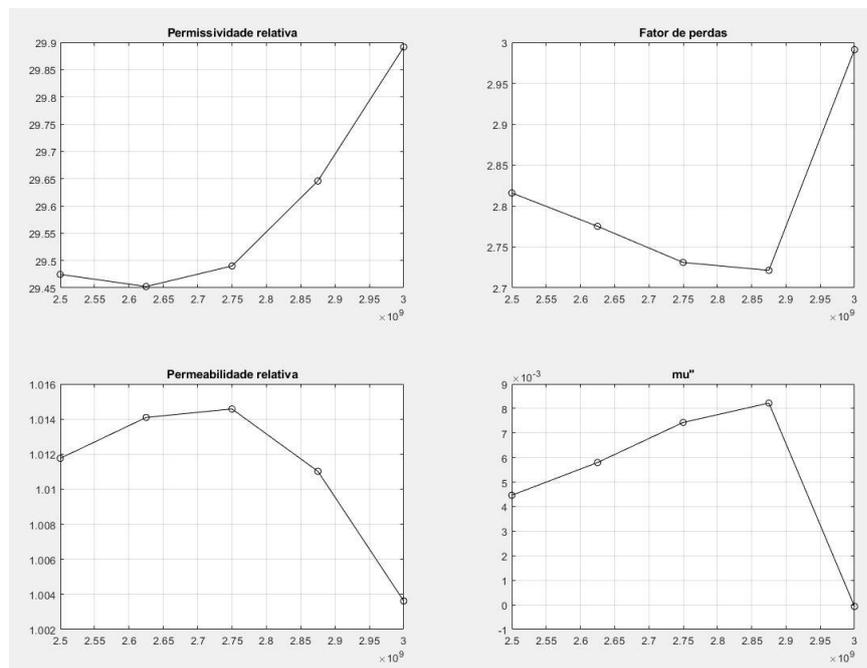
Figura 4 –Parâmetros de espalhamento plotados na carta de Smith em função de frequência.



O método NRW permite o cálculo da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética. No entanto, o objetivo deste trabalho limitou-se apenas à caracterização da permissividade elétrica. Mais investigação será necessária para a aplicação deste método à amostras magnéticas.

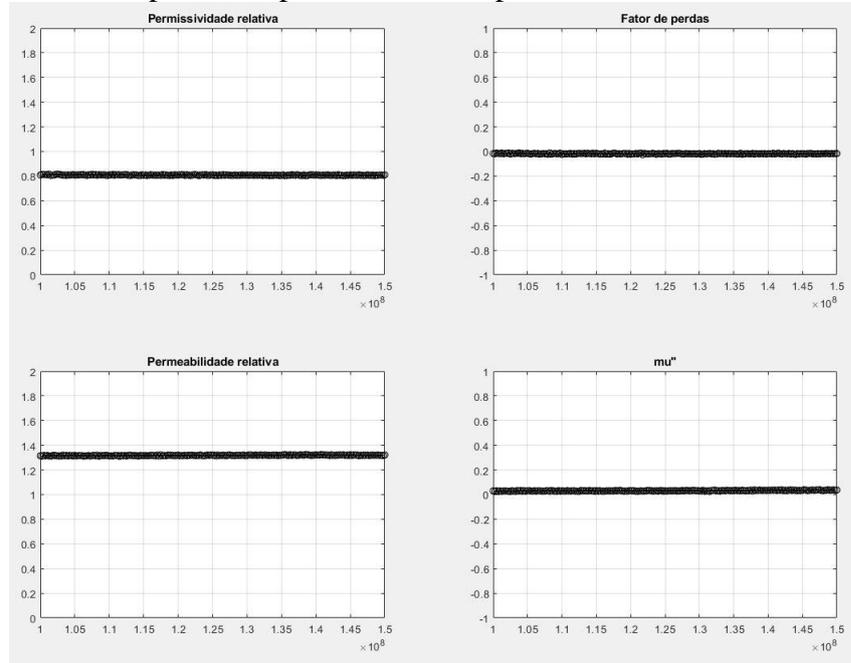
A Figura 5 mostra os valores calculados para a permissividade elétrica (e permeabilidade magnética) segundo o algoritmo NRW nas condições aplicadas na simulação descrita acima. Os resultados mostram valores compatíveis aos esperados.

Figura 5 – Resultados de permissividade (e permeabilidade) complexa calculados a partir dos parâmetros de espalhamento simulados.



A Figura 6 mostra os resultados calculados a partir de medições reais utilizando o *sample holder* vazio (*i.e.* preenchido com ar) acoplado ao VNA. O intervalo de frequência considerado é de 100 a 150 MHz. Novamente os resultados são compatíveis com os esperados.

Figura 6 – Resultados de permissividade (e permeabilidade) complexa do ar calculados a partir dos parâmetros de espalhamento reais.



A faixa de frequência usada na medição do *sample holder* com ar foi significativamente menor do que a usada na simulação eletromagnética; isto se deve ao fato de que o comprimento elétrico da amostra deve ser inferior a  $\lambda/4$  a fim de minimizar a incerteza experimental (Stuchly e Matuszewski, 1978). Há também um aspecto relacionado à indeterminação da fase – em múltiplos inteiros de  $2\pi$  – do logaritmo complexo em (2). Esta é uma limitação importante no caso de não haver qualquer estimativa *a priori* da característica do material sob teste.

A Figura 7 mostra os resultados calculados a partir de medições reais utilizando o *sample holder* preenchido com água destilada, acoplado ao VNA. A medição ocorreu com temperatura aproximada de 20 °C. O intervalo de frequência considerado foi de 100 a 150 MHz.

Figura 7 – Resultados de permissividade (e permeabilidade) complexa de água destilada calculados a partir dos parâmetros de espalhamento reais.

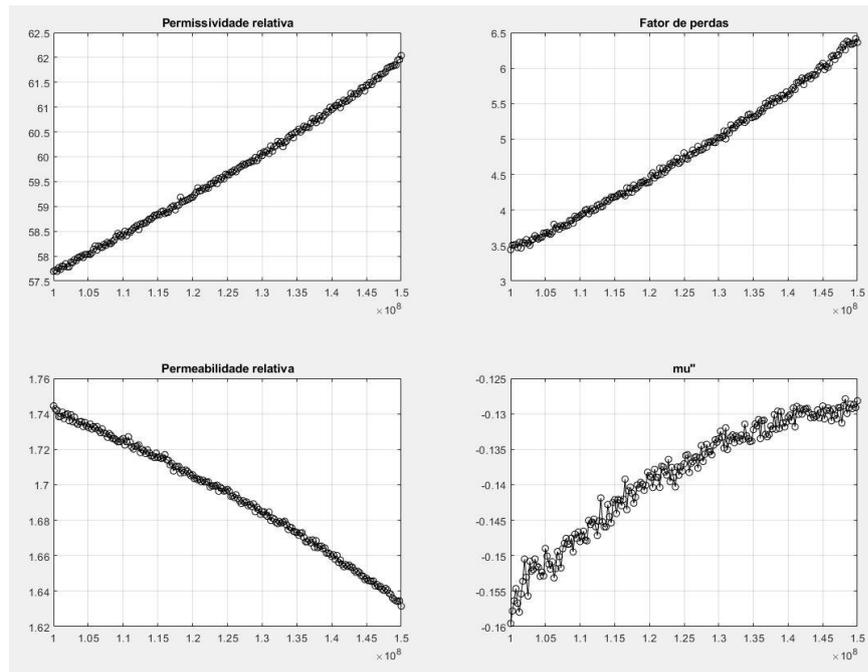
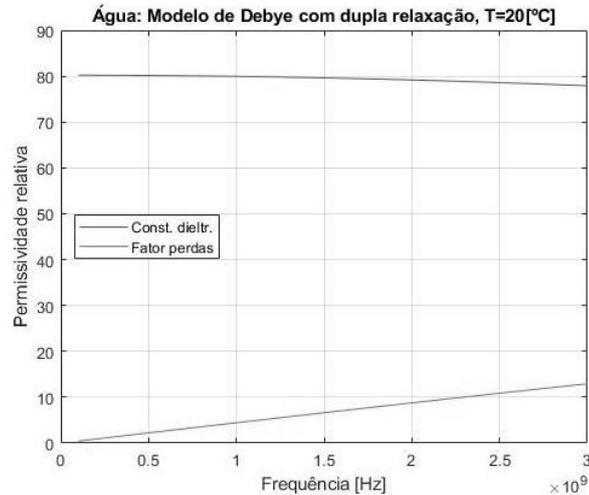


Figura 8 – Valores da permissividade de água destilada em função da frequência segundo modelo de Debye com dupla relaxação.



As figuras apresentadas representam uma parcela pequena das medições realizadas. Observa-se uma significativa degradação dos resultados encontrados com o aumento da frequência. Isto se dá por, pelo menos, dois motivos: (1) o comprimento elétrico da amostra no interior do *sample holder* aumenta com a frequência e isto não foi contemplado neste trabalho; (2) a mudança de dimensões e de materiais nas transições entre os cabos coaxiais e o *sample holder* apresenta um efeito capacitivo nos planos das discontinuidades cujo efeito é tanto maior quanto maior for a frequência. Infelizmente esta característica não foi quantificada e não pode ser acrescentada no modelo. Evidentemente, os resultados do trabalho realizado apresentam limitações em frequência e deverão ser objeto de refinamento em investigações futuras.

## Conclusões

O trabalho apresentou um estudo da aplicação de técnicas baseadas no método de transmissão e reflexão em conjunto com o algoritmo NRW para caracterização da permissividade elétrica complexa de materiais em frequências na faixa de micro-ondas.

A validação do método foi confirmada por simulações computacionais através do COMSOL Multiphysics. A partir da determinação dos parâmetros de espalhamento simulados no *software*, a aplicação do algoritmo NRW apresentou resultados com boa concordância com os valores teóricos para valores de frequência compreendidos na faixa de 2,50 – 3,00 GHz.

O sensor coaxial construído, com precisão nas suas medidas até a primeira casa decimal, permitiu que fossem realizadas algumas medições reais. Os melhores resultados para a permissividade elétrica complexa, tanto para o sensor vazio como para o sensor com água destilada, foram obtidos para valores de frequência na faixa de 100 – 150 MHz. Apesar da calibração efetuada no VNA, fica evidente uma limitação do método proposto inicialmente, o que sugere um modelamento mais preciso do sensor construído.

Considerando uma perspectiva de trabalhos futuros, em continuidade ao que foi apresentado, sugere-se a utilização de modelos mais precisos envolvendo a utilização de circuitos de micro-ondas que implementem uma correção para a descontinuidade entre conector N e o *sample holder*. Além disso a determinação da permeabilidade complexa de materiais magnéticos também pode ser realizada.

## Referências Bibliográficas

- Agilent Technologies (2014) *E5063A Network Analyzer User's Guide*.
- Baker-Jarvis, J.; Vanzura, E.J.; Kissick, W.A. (1990) Improved Technique for Determining complex Permittivity with the Transmission/Reflection Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **38**(8), 1096-1103.
- Boughriet, A-H; Legrand, C.; Chapoton, A. (1997) Noniterative Stable Transmission/Reflection Method for Low-Loss Material Complex Permittivity Determination. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **45**(1), 52-57.
- Chen, L.F. *et al.* (2004) *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. Chichester, UK: John Wiley.
- Gupta, K.C.; Garg R.; Chadha, R. (1981) *Computer-Aided Design of Microwave Circuits*. Dedham, MA: Artech House.
- Nicolson, A.M.; Ross, G.F. (1970) Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **19**(4), 377-382.
- Pozar, D. M. (2005) *Microwave Engineering*. 4<sup>th</sup> edition. Hoboken, NJ: John Wiley.
- Stuchly, S.S.; Matuszewski, M. (1978) A Combined Total Reflection-Transmission Method in Application to Dielectric Spectroscopy. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **27**(3), 285-288.
- Weir, W.B. (1974) Automatic Measurement of complex dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. *Proceedings of the IEEE*, **62**(1), 33-36.