

1. Publicação nº <i>INPE-2814-PRE/370</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1983</i>	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem <i>DTL/DAF</i>	Programa <i>TTC/TESP</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>MONTE-CARLO MICROONDAS</i> <i>"MICROSTRIP"</i>			
7. C.D.U.: <i>621.3.029.6</i>			
8. Título <i>ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS DE UMA LINHA EM</i> <i>"MICROSTRIP" PELO MÉTODO MONTE-CARLO</i>		10. Páginas: <i>11</i>	
		11. Última página: <i>10</i>	
9. Autoria <i>Eduardo Antonio Parada Tude</i> <i>Maurício Garcia Chiarello (ITA)</i>		12. Revisada por <i>Lucio B.T. Cividanes</i>	
Assinatura responsável <i>Eduardo Antonio Parada Tude</i>		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor Geral	
14. Resumo/Notas <i>Analisa-se o efeito de tolerâncias em W, H e ϵ_r na impedância e $\epsilon_{\text{efetivo}}$ de uma linha em "microstrip" pelo método de Monte-Carlo. Apresentam-se como exemplo os dielétricos da Duroid que têm as suas distribuições de Z e $\epsilon_{\text{efetivo}}$ calculadas e determinam-se também as respectivas sensitividades. O programa desenvolvido pode ser empregado para análise de circuitos mais complexos.</i>			
15. Observações <i>Submetido para apresentação no I Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, PUC/RJ - 5 a 9 de setembro de 1983.</i>			

ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS DE UMA LINHA EM "MICROSTRIP" PELO MÉTODO MONTE-CARLO

Eduardo A.P. Tude e Maurício Garcia Chiarello

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE e Instituto Tecnológico de
Aeronáutica - ITA, 12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Analisa-se o efeito de tolerâncias em W, H e ϵ_r na impedância e $\epsilon_{\text{efetivo}}$ de uma linha em "microstrip" pelo método de Monte-Carlo. Apresentam-se como exemplo os dielétricos da Duroid que têm as suas distribuições de Z e $\epsilon_{\text{efetivo}}$ calculadas e determinam-se também as respectivas sensibilidades. O programa desenvolvido pode ser empregado para análise de circuitos mais complexos.

1. INTRODUÇÃO

O cálculo da impedância e do $\epsilon_{\text{efetivo}}$ de uma linha em "microstrip" pode ser feito por um grande número de métodos que incluem efeitos como dispersão na frequência, anisotropia e espessura da lâmina condutora. No entanto, muitos destes parâmetros podem influir menos que as variações na largura e comprimento da linha devido ao processo de fabricação, ou que o $\Delta\epsilon$ e ΔH do dielétrico fornecidos pelo fabricante. Para investigar estes efeitos é necessário uma análise de tolerâncias da linha. Esta análise tem sido feita pelo método do pior caso, calculando-se as sensibilidades a partir das fórmulas de Wheeler (1965).

Neste trabalho utiliza-se o método de Monte-Carlo que proporciona valores mais próximos da realidade, menos conservativos, o que implica menores custos. Permite também a análise de circuitos mais complexos, que têm estas linhas como elementos.

Na Seção 2 apresenta-se o método de análise, na Seção 3 alguns resultados obtidos para os dielétricos da Duroid e na Seção 4 as conclusões.

2. MÉTODO DE MONTE-CARLO

O método de Monte-Carlo vem sendo utilizado para análise de tolerâncias de circuitos, conforme Bohling (1970) e Balaban (1975). Obtém-se a partir dele uma distribuição dos parâmetros de saída, calculados a partir de valores aleatórios dos parâmetros de entrada escolhidos repetidas vezes.

Neste trabalho, analisa-se uma linha em "microstrip" cujos parâmetros Z e $\epsilon_{\text{efetivo}}$ dependem de W, H e ϵ_r que apresentam variações $\Delta W, \Delta H$ e ϵ_r , respectivamente. Estes parâmetros X de entrada são escolhidos como:

$$X = X_{\min} + 2 \Delta X \text{ NAU},$$

ou

$$X = X + \Delta X/3 \text{ NAN},$$

onde NAU e NAN são números aleatórios gerados por uma sub-rotina "RANDOM" de distribuição uniforme ou normal.

Calcula-se, então, Z e $\epsilon_{\text{efetivo}}$ através de uma sub-rotina que utiliza fórmulas aproximadas desenvolvidas por Hammerstad (1980). Estas expressões são compactas e apresentam diferenças menores que .03% (.10% para $W/H < 2$), quando comparadas com métodos computacionais mais precisos. Introduzem-se nestas fórmulas correções para dispersão em frequência, efeito da espessura da lâmina condutora e anisotropia do dielétrico. Este processo quando repetido N vezes dará uma distribuição de Z e $\epsilon_{\text{efetivo}}$, que pode ser então analisado, determinando-se a média, valores mínimos e máximos, e o desvio padrão para Z e $\epsilon_{\text{efetivo}}$.

3. RESULTADOS

Os substratos da Duroid são usados como exemplo de aplicação. Suas características são apresentadas na Tabela 1.

Eles foram analisados para tolerâncias uniforme e normalmente distribuídas, para ΔW de 10%, obtendo-se os histogramas das Figuras 1 e 2, respectivamente. As Tabelas 2 e 3 apresentam as características destas distribuições.

TABELA 1
DIELETRICOS DA DUROID

SUBSTRATO	H	ϵ_r	W para $Z = 50\Omega$
A	0,031" $\pm$ 3%	2,2 $\pm$ 0,2	2,426 mm
B	1/20" $\pm$ 3%	10,5 $\pm$ 0,25	1,1152 mm

TABELA 2
TOLERÂNCIAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS

PARÂMETRO	SUBSTRATO	ΔW	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
Z	A	2%	50,02	46,67	53,57	1,33
		10%	50,11	44,52	56,41	2,28
	B	2%	50,00	48,37	51,64	0,59
		10%	50,05	46,69	53,63	1,45
$\epsilon_{\text{efetivo}}$	A	2%	1,884	1,733	2,034	0,085
		10%	1,883	1,728	2,042	0,085
	B	2%	6,967	6,789	7,148	0,091
		10%	6,966	6,752	7,187	0,096

TABELA 3

TOLERÂNCIAS NORMALMENTE DISTRIBUÍDAS

PARÂMETRO	SUBSTRATO	ΔW	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
Z	A	2%	50,00	47,14	52,88	0,77
		10%	50,04	45,42	54,77	1,33
	B	2%	50,00	48,63	51,18	0,346
		10%	50,03	47,02	52,83	0,850
$\epsilon_{\text{efetivo}}$	A	2%	1,884	1,716	2,062	0,048
		10%	1,884	1,712	2,059	0,049
	B	2%	6,967	6,784	7,162	0,052
		10%	6,967	6,761	7,182	0,055

Com estes dados pode-se calcular as sensitividades envolvidas nas expressões:

$$\frac{|\Delta Z_0|}{Z_0} = \left| \frac{\Delta W}{W} S_W^{Z_0} \right| + \left| \frac{\Delta H}{H} S_H^{Z_0} \right| + \left| \frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r} S_{\epsilon_r}^{Z_0} \right|,$$

$$\frac{|\Delta \epsilon_{\text{ef}}|}{\epsilon_{\text{ef}}} = \left| \frac{\Delta W}{W} S_W^{\epsilon_{\text{ef}}} \right| + \left| \frac{\Delta H}{H} S_H^{\epsilon_{\text{ef}}} \right| + \left| \frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r} S_{\epsilon_r}^{\epsilon_{\text{ef}}} \right|.$$

As Figuras 3 e 4 apresentam as curvas de $S_W^{Z_0}$ e $S_W^{\epsilon_{\text{ef}}}$, calculadas a partir de valores máximos e mínimos obtidos nas várias impedâncias pelo método de Monte-Carlo.

A Tabela 4 apresenta uma pequena comparação com os resultados obtidos analiticamente, a partir de Gupta (1979).

TABELA 4

QUADRO COMPARATIVO PARA $Z_0 = 50\Omega$

$S_W^{Z_0}$	ANALÍTICO	MONTE-CARLO
A	- 0,666	0,673
B	- 0,477	0,475

4. CONCLUSÕES

Foram analisadas algumas linhas em "microstrip" para os dielétricos Duroid e apresentadas as distribuições para Z_0 e $\epsilon_{\text{efetivo}}$.

Dispõe-se agora de dados para uma análise dos efeitos das tolerâncias em W, H e ϵ_r nos valores de Z e $\epsilon_{\text{efetivo}}$. Nota-se, por exemplo, como esperado, um maior confinamento em torno da média se considerarem-se as tolerâncias normalmente distribuídas. De acordo com a aplicação desejada pode-se escolher o dielétrico que melhor se aplica (ΔH e $\Delta \epsilon_r$) e analisar os efeitos da tolerância no processo de fabricação. Estes dados são particularmente importantes para fabricação seriada destes circuitos.

O método de Monte-Carlo amplia a possibilidade de análise de tolerâncias, pois permite agora combinar várias linhas em um circuito de microondas que pode então ter seu comportamento analisado.

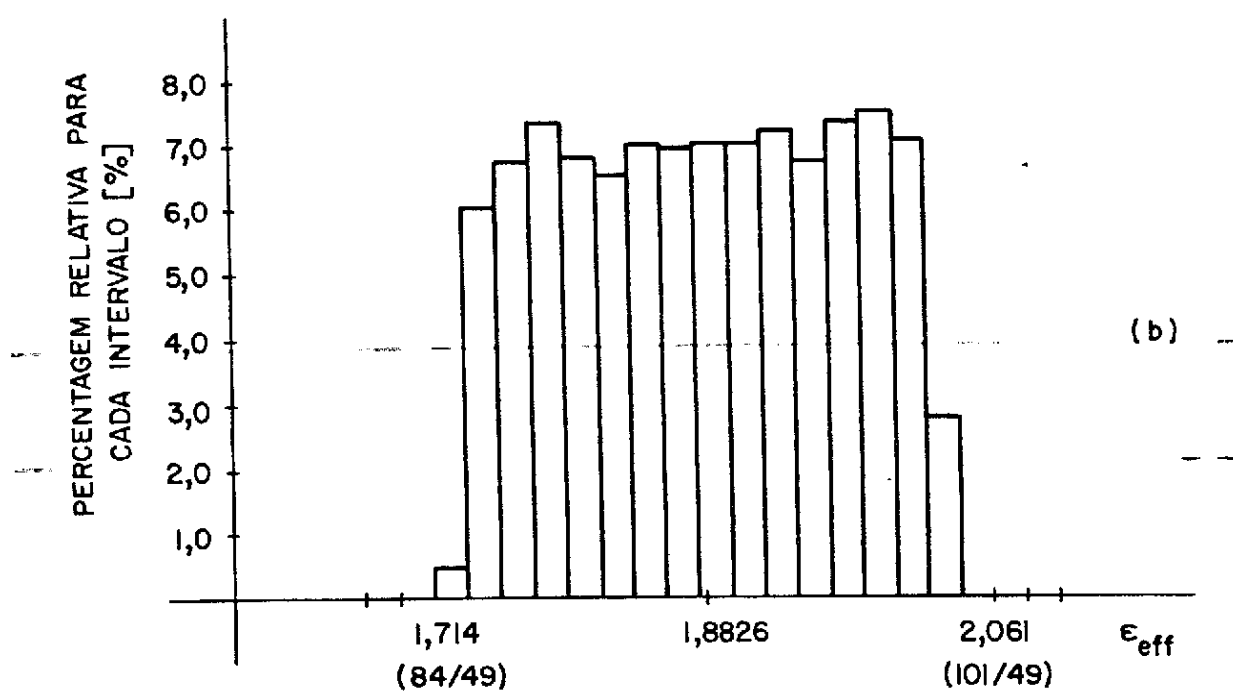
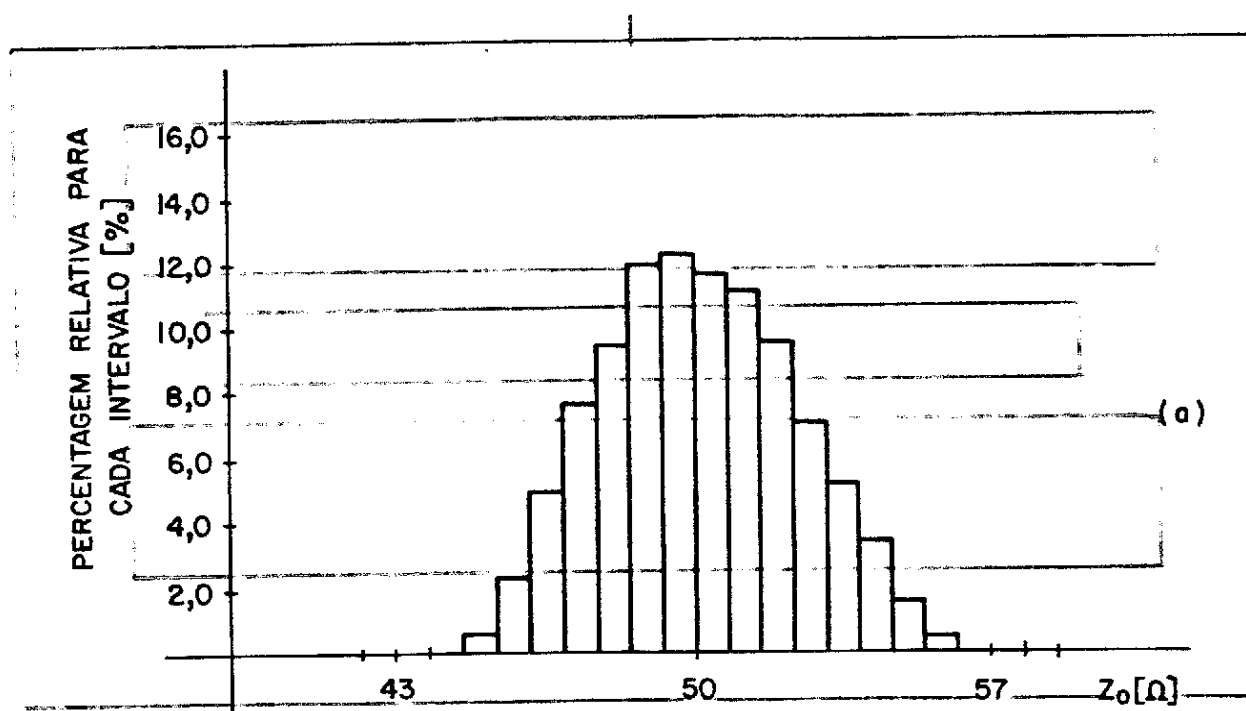
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- WHEELER, H.A. "Transmission line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, MTT-13(3):172-185, Mar. 1965.
- HAMMERSTAD, E.; MELBER, I.; JENSEN, O.; BEKKADAL, F. "Simulation of microwave components". ELAB - report STF44 F80127, Dec. 1980, Trondheim, Norway.

BOHLING, M.D.; O'NEILL, L.A. "An interactive computer approach to tolerance analysis". IEEE Transactions on Computers, C-19(1):10-16, Jan. 1970.

BALABAN, P.; GOLEMBESKI, J.J. "Statistical analysis for practical circuit design". IEEE Transactions on Circuits and System, CAS-22(2):100-108, Feb. 1975.

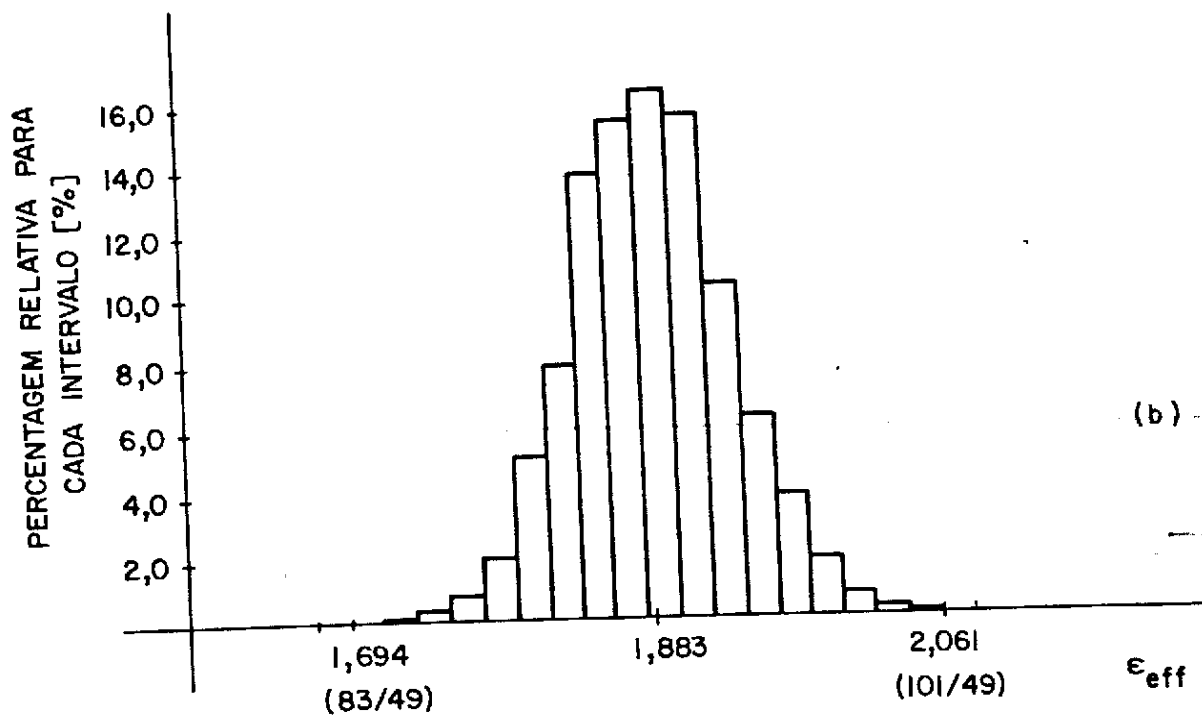
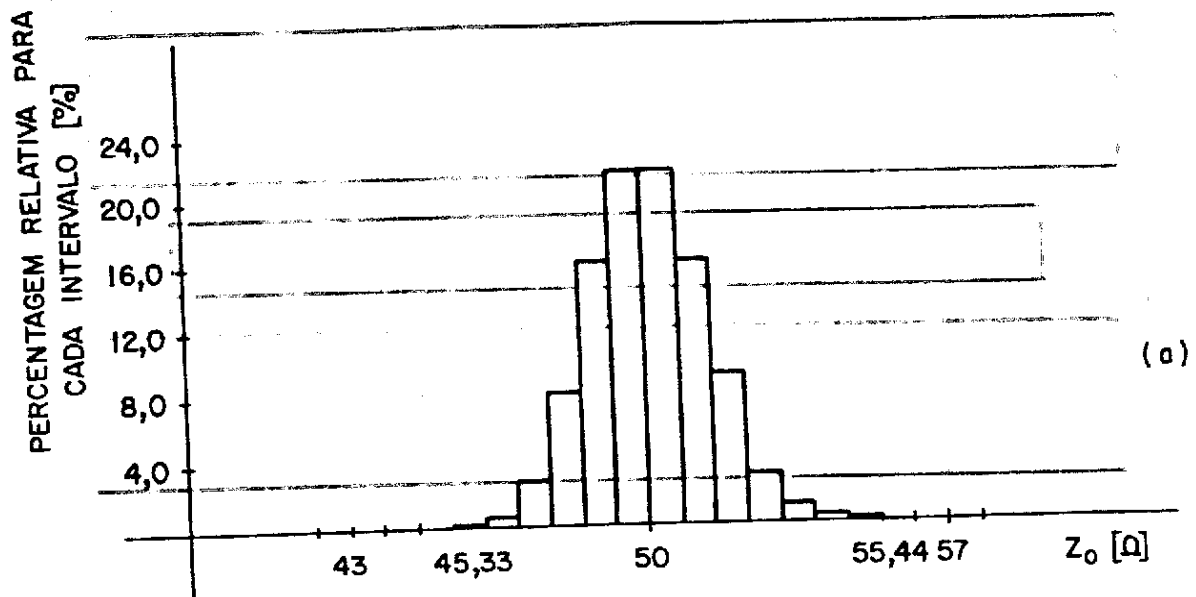
GUPTA, K.C.; GARG, R.; BAHL, I.J. "Microstrip lines and slotlines", Dedham, Artech House, 1979.



a) Impedância característica;

b) Constante dielétrica efetiva.

Fig. 1 - Tolerâncias uniformemente distribuídas ($N_0 = 10000$).



- a) Impedância característica;
b) Constante dielétrica efetiva.

Fig. 2 - Tolerâncias normalmente distribuídas com $\sigma_x = \frac{\Delta x}{3}$.

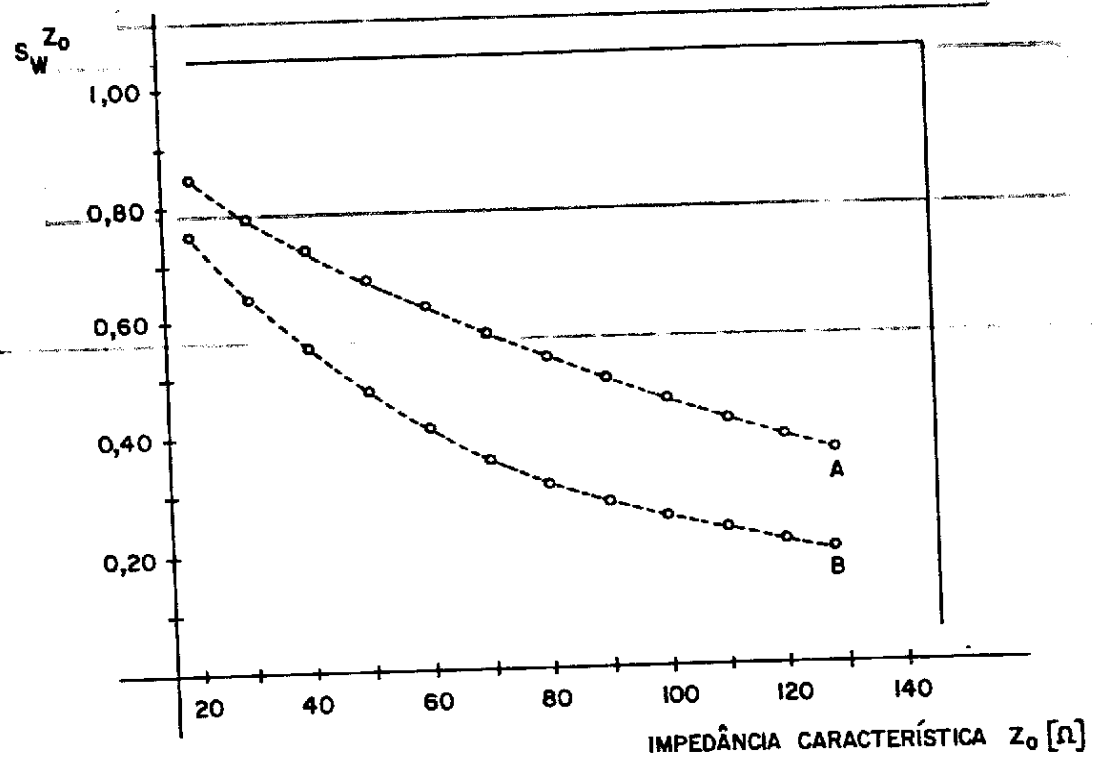


Fig. 3 - Sensitividade $S_W^{Z_0}$ para dois substratos da RT Duroid.

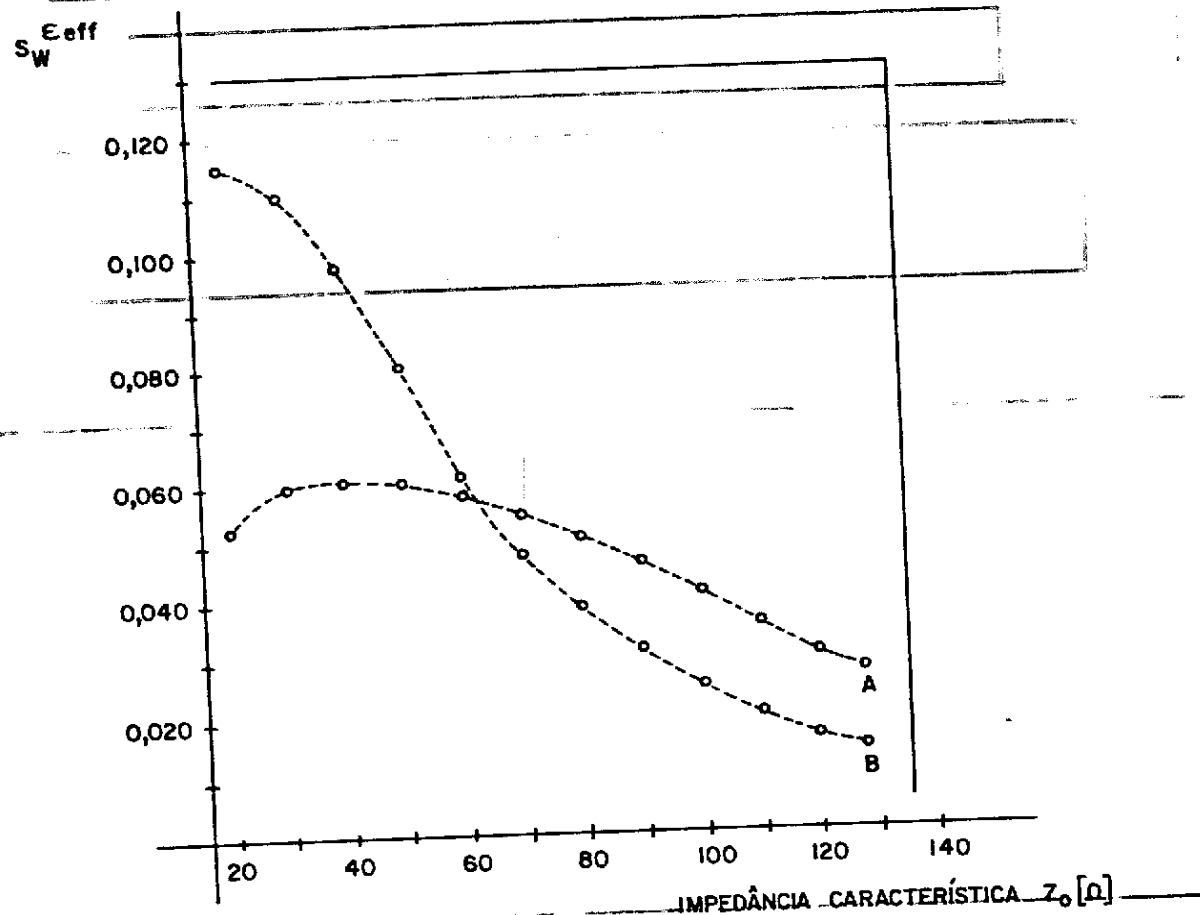


Fig. 4 - Sensitividade $S_W^{\epsilon^{eff}}$ para dois substratos da RT Duroid.