

DANIEL KENJI TAKAYASSU

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SOFTWARES PARA RF E MICROONDAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia de Computação com
ênfase em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Amilcar Careli César

São Carlos
2007

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABELAS	4
RESUMO	5
1. INTRODUÇÃO	6
1.1. ANÁLISE DE CIRCUITOS DE ALTA FREQUÊNCIA	6
1.1.1. MATRIZ ADMITÂNCIA (Y)	6
1.1.2. MATRIZ IMPEDÂNCIA (Z)	7
1.1.3. MATRIZ DE PARÂMETROS HÍBRIDOS (h)	8
1.1.4. MATRIZ ABCD	8
1.2. MATRIZ DE ESPALHAMENTO (S)	15
2. DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES	18
2.1. FERRAMENTA WinTLS 1.0	18
2.2. FERRAMENTA AppCAD	20
2.3. FERRAMENTA SERENADE SV 8.5	21
2.4. FERRAMENTA ANSOFT DESIGNER SV 2.2.0	23
3. AVALIAÇÃO DOS SOFTWARES	25
3.1. MODO DE AVALIAÇÃO	25
3.2. PROJETO DE FILTRO PASSA-BAIXAS	25
3.2.1. PROJETO DE FILTRO COM O SERENADE SV	25
3.2.2. PROJETO DE FILTRO COM O ANSOFT DESIGNER SV	27
3.3. PROJETO DE AMPLIFICADOR DE 2 ESTÁGIOS	29
3.3.1. PROJETO DE AMPLIFICADOR COM O SERENADE SV	29
4. CONCLUSÃO	38
5. ANEXOS	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de 2 portas	6
Figura 2 – Rede de 2 portas com impedância em série	9
Figura 3 – Rede de 2 portas com admitância em paralelo	10
Figura 4 – Rede de 2 portas com trecho de LT sem perdas	11
Figura 5 – Matriz ABCD de duas redes de 2 portas em cascata	14
Figura 6 – Rede de 2 portas com impedância casada na porta (2) e fonte na porta (1)	15
Figura 7 – Rede de 2 portas com impedância casada na porta (1) e fonte na porta (2)	16
Figura 8 – Interface do WinTLS 1.0	18
Figura 9 – Simulação WinTLS com casamento de impedância	19
Figura 10 – Simulação WinTLS sem casamento de impedância	19
Figura 11 – Interface AppCAD para simulação em microfita	20
Figura 12 – Interface do Serenade SV 8.5	22
Figura 13 – Módulos de controle do Serenade SV 8.5	22
Figura 14 – Interface do Ansoft Designer SV 2.2.0	23
Figura 15 – Interface do Ansoft Designer SV para projeto de filtros	24
Figura 16 – Estrutura inicial de um filtro passa-baixas de ordem 5	26
Figura 17 – Parâmetros (S) X Frequência (Serenade SV)	27
Figura 18 – Filtro protótipo e curvas dos parâmetros (S) (Ansoft Designer SV)	28
Figura 19 – Circuito montado do filtro e curvas dos parâmetros (S)	28
Figura 20 – Amplificador de 2 estágios	29
Figura 21 – Módulo de controle do substrato	30
Figura 22 – Módulo de controle da frequência	30
Figura 23 – Módulo de controle das variáveis	31
Figura 24 – Módulo de otimização das variáveis	31
Figura 25 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 do amplificador	32
Figura 26 – Interface de otimização do modo Gradient	34
Figura 27 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Gradient	34
Figura 28 – Interface de otimização do modo Random	35
Figura 29 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Random	35

Figura 30 – Interface de otimização do modo Minimax	36
Figura 31 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Minimax	36
Figura 32 – Interface de otimização do modo Lev-Marq	37
Figura 33 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Lev-Marq	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos da Matriz Admitância	7
Tabela 2 – Elementos da Matriz Impedância	7
Tabela 3 – Elementos da Matriz de Parâmetros Híbridos	8
Tabela 4 – Elementos da Matriz ABCD	9
Tabela 5 – Características dos parâmetros S11 e S21	16
Tabela 6 – Características dos parâmetros S22 e S12	17
Tabela 7 – Especificações do filtro passa-baixas	25

RESUMO

Neste trabalho estão apresentadas algumas ferramentas de análise de circuitos de alta frequência. Depois de uma breve revisão bibliográfica, serão apresentados quatro softwares de RF e microondas: **WinTLS 1.0**, **AppCAD**, **Serenade SV 8.5** e **Ansoft Design SV 2.2.0**.

Softwares para simulação e projeto normalmente são caros, portanto este trabalho fará uma análise apenas de versões gratuitas dos softwares descritos.

O software WinTLS serve para simular a transmissão de ondas numa linha de transmissão. O software AppCAD é utilizado para cálculo de características (dimensões, impedância, frequência de operação...) dos circuitos pré-fornecidos por ele (circuitos BIAS, detectores de sinal, microfita, cabo coaxial...). O Serenade SV permite a construção e a simulação de circuitos mais específicos (filtros de frequência, amplificadores...), bem como a otimização dos mesmos. O Ansoft Designer SV também permite a construção e a simulação de circuitos específicos, podendo ser usado para praticamente as mesmas aplicações do Serenade SV.

Dado que os softwares são, de modo geral, complementares entre si por possuírem propósitos específicos, este trabalho fará uma comparação de maneiras e praticidade de uso dos softwares, ao invés de comparar o desempenho entre eles.

Palavras-chaves: WinTLS, AppCAD, Agilent, Serenade, Ansoft, Ansoft Designer

ABSTRACT

This assignment presents some tools of high-frequencies circuits analysis. After a short bibliographic revision, four RF and microwaves softwares will be presented: **WinTLS 1.0**, **AppCAD**, **Serenade SV 8.5** e **Ansoft Design SV 2.2.0**.

Softwares for simulation and design usually are expensive, so this assignment will make an analysis with freeware softwares only.

WinTLS simulates waves' transmission on a transmission line. AppCAD calculates characteristics of pre-existing circuits (BIAS-circuits, signal-detectors, microstrip, coax...). Serenade allows design and simulation of more specific circuits (filters, amplifiers...), so as their optimization. Ansoft Designer does the same and can be used for the same purposes as Serenade.

Since the softwares are complementary to each other, this assignment will make a versatility comparison between them, instead of a performance comparison.

Keywords: WinTLS, AppCAD, Agilent, Serenade, Ansoft, Ansoft Designer

1. INTRODUÇÃO

1.1 ANÁLISE DE CIRCUITOS DE ALTA FREQUÊNCIA

Geralmente, quando se analisa um determinado circuito (ou rede circuital), dependendo da sua complexidade, não é interessante analisar cada componente do circuito individualmente. A isso, adiciona-se o fato de que normalmente os circuitos já vêm encapsulados de fábrica (na forma de módulos individuais) e a tarefa de se analisar um circuito componente por componente torna-se ainda mais dispendiosa.

Por isso, houve a necessidade de criar ferramentas de análise que abordassem o circuito como uma “caixa-preta”, isto é, que precisassem apenas dos valores medidos na entrada e na saída do circuito para estimar as propriedades do circuito. Essas ferramentas consistem em matrizes que relacionam os valores de tensão, corrente e ondas nas portas de entrada e saída do circuito, quando uma delas está em curto-circuito ou em circuito aberto. As principais matrizes são:

- a) Matriz Admitância (Y)
- b) Matriz Impedância (Z)
- c) Matriz de Parâmetros Híbridos (h)
- d) Matriz ABCD

Por questão de simplicidade, as matrizes mostradas a seguir são referentes a uma rede de duas portas.

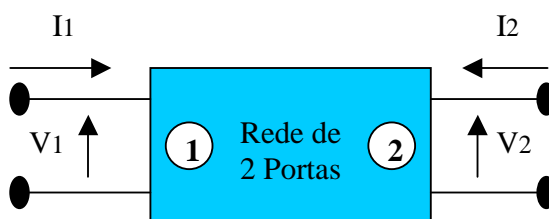


Figura 1 – Rede de 2 portas

1.1.1 MATRIZ ADMITÂNCIA (Y)

A Matriz Admitância relaciona os valores de corrente nas portas com os valores de tensão nas portas da maneira $(I) = (Y) (V)$. No caso de uma rede de 2 portas, a matriz é composta por 04 elementos.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

Os valores da matriz (Y) são mostrados na Tabela 1, dados por [Gonzalez, 1997].

Tabela 1 – Elementos da Matriz Admitância

Elemento	Fórmula	Condição	Nome
Y11	I1 / V1	Porta 2 em curto (V2 = 0)	Admitância de entrada
Y21	I2 / V1	Porta 2 em curto (V2 = 0)	Transadmitância direta
Y12	I1 / V2	Porta 1 em curto (V1 = 0)	Transadmitância reversa
Y22	I2 / V2	Porta 1 em curto (V1 = 0)	Admitância de saída

1.1.2 MATRIZ IMPEDÂNCIA (Z)

A Matriz Impedância relaciona os valores de tensão nas portas com os valores de corrente nas portas da maneira (V) = (Z) (I), ou seja, o inverso da Matriz Admitância. No caso de uma rede de 2 portas, a matriz também é composta por 04 elementos, sendo dados por [Gonzalez, 1997].

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

Os valores da Matriz (Z) são mostrados na Tabela 2, dados por [Gonzalez, 1997].

Tabela 2 – Elementos da Matriz Impedância

Elemento	Fórmula	Condição	Nome
Z11	V1 / I1	Porta 2 em aberto (I2 = 0)	Impedância de entrada
Z21	V2 / I1	Porta 2 em aberto (I2 = 0)	Transimpedância direta
Z12	V1 / I2	Porta 1 em aberto (I1 = 0)	Transimpedância reversa
Z22	V2 / I2	Porta 1 em aberto (I1 = 0)	Impedância de saída

1.1.3 MATRIZ DE PARÂMETROS HÍBRIDOS (h)

A Matriz de Parâmetros Híbridos relaciona os valores de tensão de entrada e de corrente de saída com os valores de corrente de entrada e de tensão de saída. Como os elementos de entrada e saída são misturados, daí vem o nome “híbrido”. No caso de uma rede de 2 portas, a matriz também é composta por 4 elementos.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

Os valores da Matriz (h) são mostrados na Tabela 3, dados por [Gonzalez, 1997].

Tabela 3 – Elementos da Matriz de Parâmetros Híbridos

Elemento	Fórmula	Condição	Nome
h11	V_1 / I_1	Porta 2 em curto ($V_2 = 0$)	Impedância de entrada
h21	I_2 / I_1	Porta 2 em curto ($V_2 = 0$)	Ganho direto de corrente
h12	V_1 / V_2	Porta 1 em aberto ($I_1 = 0$)	Ganho reverso de tensão
h22	I_2 / V_2	Porta 1 em aberto ($I_1 = 0$)	Admitância de saída

1.1.4 MATRIZ ABCD

A Matriz ABCD relaciona diretamente os valores de tensão e corrente de entrada com os valores de tensão e corrente de saída. No caso de uma rede de 2 portas, a matriz também é composta por 4 elementos.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

Os valores da Matriz ABCD são mostrados na Tabela 4, dados por [Gonzalez, 1997].

Tabela 4 – Elementos da Matriz ABCD

Elemento	Fórmula	Condição	Nome
A	V_1 / V_2	Porta 2 em aberto ($I_2 = 0$)	Ganho reverso de tensão
B	V_1 / I_2	Porta 2 em curto ($V_2 = 0$)	Transimpedância reversa
C	I_1 / V_2	Porta 2 em aberto ($I_2 = 0$)	Transadmitância reversa
D	I_1 / I_2	Porta 2 em curto ($V_2 = 0$)	Ganho reverso de corrente

Para determinadas redes de duas portas já existem matrizes ABCD tabeladas, como por exemplo, para impedância em série, para admitância em paralelo e para trecho de linha de transmissão sem perdas.

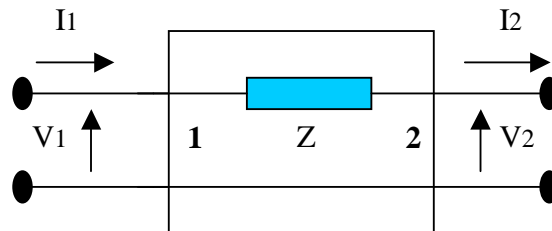


Figura 2 – Rede de 2 portas com impedância em série

Expandindo a Matriz ABCD, tem-se o seguinte sistema linear:

$$\begin{cases} V_1 = A \cdot V_2 + B \cdot I_2 & (1) \\ I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_2 & (2) \end{cases}$$

Como $I_1 = I_2$, substitui-se na equação (2):

$$I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_1$$

$$C = 0 \quad D = 1$$

$$V_1 = Z \cdot I_1 + V_2 = V_2 + 2 \cdot I_2 \quad (3)$$

Comparando a equação (3) com a equação (1), tem-se:

$$A = 1 \quad B = Z$$

Assim, tem-se que a Matriz ABCD da rede de 2 portas com impedância em série é:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

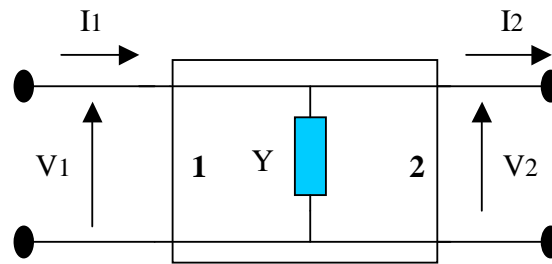


Figura 3 – Rede de 2 portas com admitância em paralelo

Expandindo-se a Matriz ABCD, tem-se o seguinte sistema linear:

$$\begin{cases} V_1 = A \cdot V_2 + B \cdot I_2 & (1) \\ I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_2 & (2) \end{cases}$$

Como $V_1 = V_2$, substitui-se na equação (1):

$$V_1 = A \cdot V_1 + B \cdot I_2$$

$$A = 1 \quad B = 0$$

$$I_1 = Y \cdot V_1 + I_2 = Y \cdot V_2 + I_2 \quad (3)$$

Comparando a equação (3) com a equação (1), tem-se:

$$C = Y \quad D = 1$$

Assim, tem-se que a Matriz ABCD da rede de 2 portas com admitância em paralelo é:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{pmatrix}$$

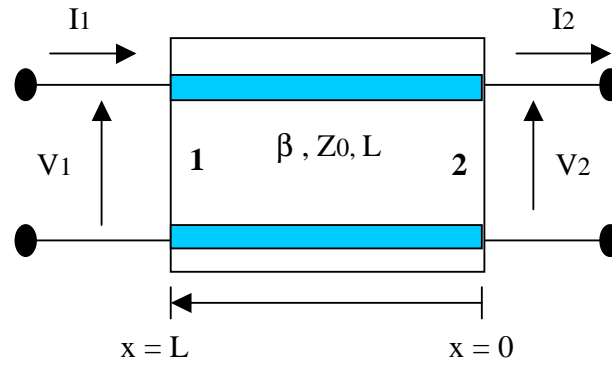


Figura 4 – Rede de 2 portas com trecho de LT sem perdas

Sabendo que os valores de tensão e de corrente variam na LT segundo o seguinte sistema:

$$\begin{cases} V(x) = V_i \cdot e^{j\beta x} + V_r \cdot e^{-j\beta x} \\ I(x) = \frac{V_i \cdot e^{j\beta x} - V_r \cdot e^{-j\beta x}}{Z_0} \end{cases}$$

Onde V_i é a amplitude da tensão incidente e V_r é a amplitude da tensão refletida.

Pode-se então, através das fórmulas expressas na Tabela 4, achar os valores de A, B, C e D:

$$\bullet \quad A = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_2=0}$$

$$\begin{cases} V(x=0) = V_2 = V_i + V_r \\ V(x=L) = V_1 = V_i \cdot e^{j\beta L} + V_r \cdot e^{-j\beta L} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_2 = V_i \cdot \left(1 + \frac{V_r}{V_i} \right) \\ V_1 = V_i \cdot \left(e^{j\beta L} + \frac{V_r}{V_i} \cdot e^{-j\beta L} \right) \end{cases}$$

Como a porta 2 está em circuito aberto, então $(V_r / V_i) = \Gamma_L = +1$.

$$\begin{cases} V_2 = 2 \cdot V_i \\ V_1 = V_i \cdot (e^{j\beta L} + e^{-j\beta L}) \end{cases}$$

Como $A = (V_1 / V_2)$, tem-se então:

$$A = \frac{V_1}{V_2} = \frac{e^{j\beta L} + e^{-j\beta L}}{2} \quad A = \cos(\beta L)$$

$$\bullet \quad B = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{V_2=0}$$

$$\begin{cases} V(x=L) = V_1 = V_i \cdot \left(e^{j\beta L} + \frac{V_r}{V_i} \cdot e^{-j\beta L} \right) \\ I(x=0) = I_2 = \frac{V_i}{Z_0} \cdot \left(1 - \frac{V_r}{V_i} \right) \end{cases}$$

Como a porta 2 está em curto-circuito, então $(V_r / V_i) = \Gamma_L = -1$.

$$\begin{cases} V_1 = V_i \cdot (e^{j\beta L} - e^{-j\beta L}) \\ I_2 = \frac{2 \cdot V_i}{Z_0} \end{cases}$$

Como $B = (V_1 / I_2)$, tem-se então:

$$B = \frac{V_1}{I_2} = Z_0 \cdot \frac{e^{j\beta L} - e^{-j\beta L}}{2} \quad B = Z_0 \cdot j \cdot \sin(\beta L)$$

$$\bullet \quad C = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{I_2=0}$$

$$\begin{cases} V(x=0) = V_2 = V_i \cdot \left(1 + \frac{V_r}{V_i}\right) \\ I(x=L) = I_1 = \frac{V_i}{Z_0} \cdot \left(e^{j\beta L} - \frac{V_r}{V_i} \cdot e^{-j\beta L}\right) \end{cases}$$

Como a porta está em circuito aberto, então $(V_r / V_i) = \Gamma_L = +1$.

$$\begin{cases} V_2 = 2 \cdot V_i \\ I_1 = \frac{V_i}{Z_0} \cdot (e^{j\beta L} - e^{-j\beta L}) \end{cases}$$

Como $C = (I_1 / V_2)$, tem-se então:

$$C = \frac{I_1}{V_2} = \frac{e^{j\beta L} - e^{-j\beta L}}{2 \cdot Z_0} \quad C = \frac{j \cdot \text{sen}(\beta L)}{Z_0}$$

$$\bullet \quad D = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_2=0}$$

$$\begin{cases} I(x=L) = I_1 = \frac{V_i}{Z_0} \cdot \left(e^{j\beta L} - \frac{V_r}{V_i} \cdot e^{-j\beta L}\right) \\ I(x=0) = I_2 = \frac{V_i}{Z_0} \cdot \left(1 - \frac{V_r}{V_i}\right) \end{cases}$$

Como a porta 2 está em curto-circuito, então $(V_r / V_i) = \Gamma_L = -1$.

$$\begin{cases} I_1 = \frac{V_i}{Z_0} \cdot (e^{j\beta L} + e^{-j\beta L}) \\ I_2 = \frac{2 \cdot V_i}{Z_0} \end{cases}$$

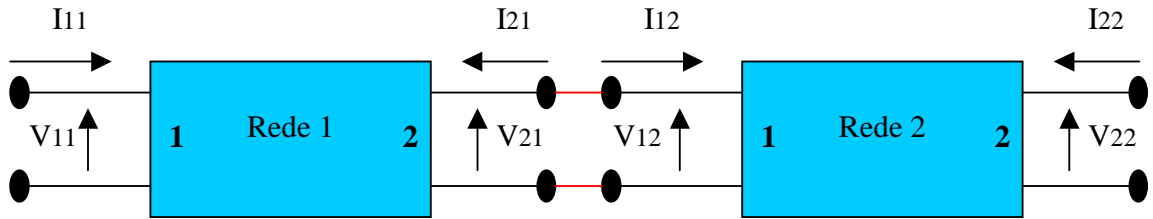
Como $D = (I_1 / I_2)$, tem-se então:

$$D = \frac{I_1}{I_2} = \frac{e^{j\beta L} + e^{-j\beta L}}{2} \quad D = \cos(\beta L)$$

Assim, tem-se que a Matriz ABCD da rede de 2 portas com trecho de linha de transmissão sem perdas é:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta L) & jZ_0 \sin(\beta L) \\ j \sin(\beta L)/Z_0 & \cos(\beta L) \end{pmatrix}$$

Uma propriedade importante da Matriz ABCD é de associação de redes em cascata. Quando duas ou mais redes estão associadas em cascata (série), a matriz ABCD global é dada pelo produto das matrizes ABCD individuais de cada rede [Gupta, 1981].



$$\begin{pmatrix} V_{11} \\ I_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{21} \\ I_{21} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} V_{12} \\ I_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{22} \\ I_{22} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{11} \\ I_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{22} \\ I_{22} \end{pmatrix}$$

Figura 5 – Matriz ABCD de duas redes de 2 portas em cascata

1.2. MATRIZ DE ESPALHAMENTO (S)

As matrizes Admitância, Impedância, de Parâmetros Híbridos e ABCD, embora funcionem bem para circuitos operando em baixa frequência, apresentam algumas falhas para circuitos operando em alta frequência:

- Capacitâncias e indutâncias parasitárias da rede são potencializadas em altas frequências, o que faz com que portas em curto-circuito e em circuito aberto não se comportem como tal.
- Dispositivos ativos (que recebem alimentação), como transistores, podem se desestabilizar em altas frequências e oscilar, afetando a validade das medidas.

Foi criado então um outro conjunto de parâmetros para determinar com maior fidelidade o comportamento de circuitos em altas frequências, denominados parâmetros de espalhamento ou Matriz de Espalhamento (S). As principais diferenças entre essa abordagem para as anteriores são:

- Ao invés de relacionar os valores de tensão e corrente nas portas, a Matriz S relaciona os valores de onda normalizada (incidente e refletida) nas portas.
- Os valores de onda normalizada são obtidos com a colocação de cargas casadas (com valor de impedância igual ao da impedância característica da respectiva porta), e não mais com portas em curto ou em aberto.

A Figura 6 mostra um esquema de uma rede de 2 portas com fonte de tensão na porta de entrada (1) e impedância casada na porta de saída (2). A partir desse esquema, são determinados os parâmetros S11 e S21.

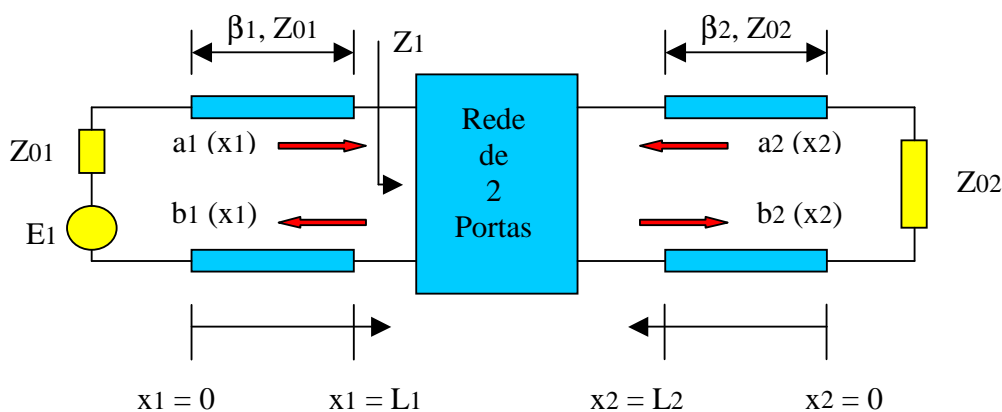


Figura 6 – Rede de 2 portas com impedância casada na porta (2) e fonte na porta (1)

As características dos parâmetros S_{11} e S_{21} são mostradas na Tabela 5 por [Gonzalez, 1997].

Tabela 5 – Características dos parâmetros S_{11} e S_{21}

Elemento	Fórmula	Condição	Nome
S_{11}	$b_1(L_1) / a_1(L_1)$	$a_2(L_2) = 0$	Coeficiente de reflexão na entrada (1) com a porta de saída (2) terminada por uma carga casada
S_{21}	$b_2(L_2) / a_1(L_1)$	$a_2(L_2) = 0$	Ganho de transmissão direta com a porta de saída (2) terminada por uma carga casada

Assim, os valores finais dos parâmetros S_{11} e S_{21} são:

$$S_{11} = \frac{Z_1 - Z_{01}}{Z_1 + Z_{01}} \quad S_{21} = \frac{2\sqrt{Z_{01}}}{\sqrt{Z_{02}}} \frac{V_2(L_2)}{E_{1,TH}}$$

Onde $V_2(L_2)$ é a tensão no ponto $x_2 = L_2$ e $E_{1,TH}$ é a tensão de Thévenin na porta (1).

A Figura 7 mostra um esquema de rede de 2 portas com fonte de tensão na porta de entrada (2) e impedância casada na porta de saída (1).

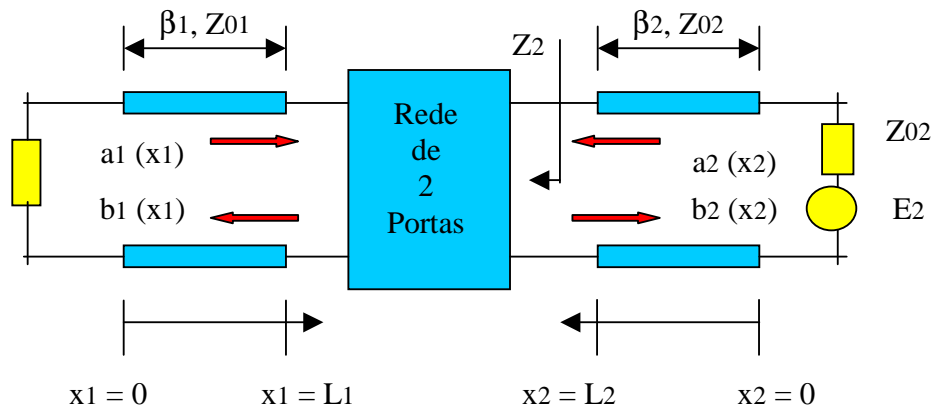


Figura 7 - Rede de 2 portas com impedância casada na porta (1) e fonte na porta (2)

As características dos parâmetros S_{22} e S_{12} são mostradas na Tabela 6 por [Gonzalez, 1997].

Tabela 6 – Características dos parâmetros S22 e S12

Elemento	Fórmula	Condição	Nome
S22	$b_2(L_2) / a_2(L_2)$	$a_1(L_1) = 0$	Coeficiente de reflexão na entrada (2) com a porta de saída (1) terminada por uma carga casada
S12	$b_1(L_1) / a_2(L_2)$	$a_1(L_1) = 0$	Ganho de transmissão direta com a porta de saída (1) terminada por uma carga casada

Assim, os valores finais dos parâmetros S11 e S21 são:

$$S_{22} = \frac{Z_2 - Z_{02}}{Z_2 + Z_{02}} \quad S_{12} = \frac{2\sqrt{Z_{02}}}{\sqrt{Z_{01}}} \frac{V_1(L_1)}{E_{2,TH}}$$

Onde $V_1(L_1)$ é a tensão no ponto $x_1 = L_1$ e $E_{2,TH}$ é a tensão de Thévenin na porta (2).

2. DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES

2.1. FERRAMENTA WinTLS 1.0

O software WinTLS 1.0 é uma ferramenta gratuita de simulação de propagação de ondas em linha de transmissão, desenvolvida pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Stanford, EUA. Trata-se de uma ferramenta simples e de uso bastante intuitivo. A Figura 8 mostra a interface principal do software.

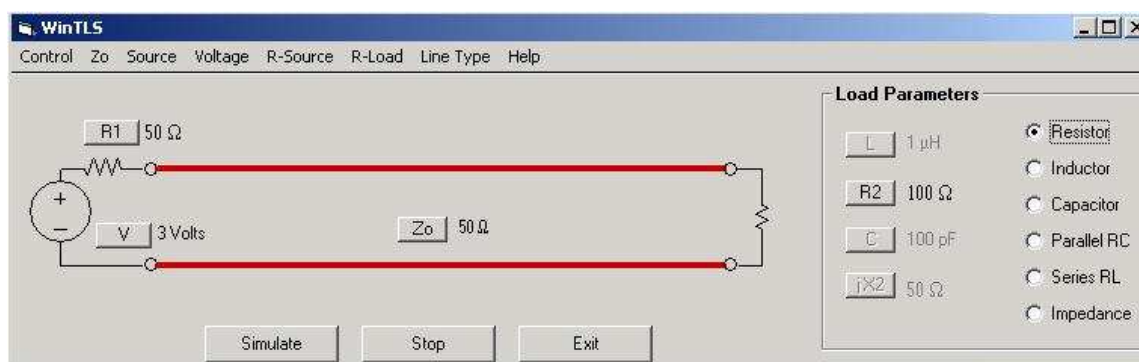


Figura 8 – Interface do WinTLS 1.0

Nesta ferramenta, as principais variáveis de simulação são: o valor de tensão e resistência da fonte, o valor de impedância característica da linha de transmissão e o valor da carga (que pode ser uma impedância, um indutor, um capacitor ou um circuito ressonante). Podem ainda ser variados a forma de onda da tensão (corrente DC, corrente AC senoidal ou co-senoidal, pulso simples ou trem de impulsos), o número de linhas de transmissão (simples ou em cascata) e a velocidade de propagação da onda.

Dependendo dos parâmetros oferecidos, a simulação de onda pode se comportar de maneira diferente. Um exemplo típico é a existência ou não de casamento de impedância da linha com a carga. Supondo que, para uma tensão senoidal, o valor da impedância característica seja 50Ω e o da impedância de carga também seja 50Ω . Nesse caso, há o casamento de impedância (100% da onda é absorvida) e o comportamento da onda é semelhante ao mostrado na Figura 9.

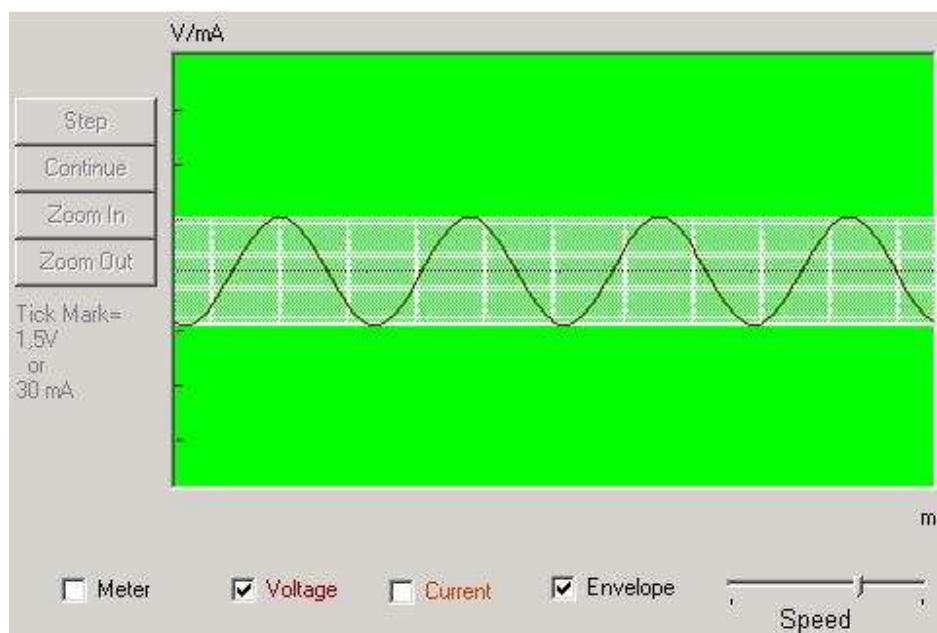


Figura 9 – Simulação WinTLS com casamento de impedância

Supondo, entretanto, para a mesma tensão senoidal, que o valor da impedância característica seja 50Ω e que o da impedância de carga seja 100Ω , então já não há mais casamento de impedância (parte da onda é refletida e há onda estacionária). Nesse caso, o comportamento é semelhante ao mostrado na Figura 10.

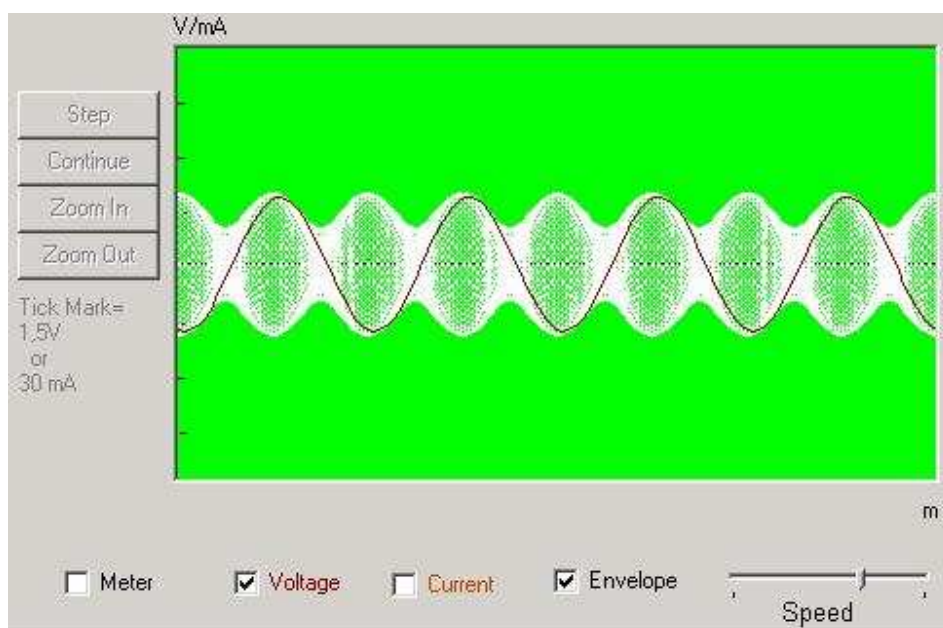


Figura 10 – Simulação WinTLS sem casamento de impedância

Apesar de simples, o WinTLS é um software bastante restrito em termos de aplicações mais amplas. Ele é usado, portanto, para fins mais didáticos e não para projetos e simulações mais complexos.

2.2. FERRAMENTA AppCAD

O software AppCAD é uma ferramenta gratuita de simulação de circuitos de alta frequência, desenvolvida pela Agilent Technologies®. Este software é mais amplo que o WinTLS, pois oferece uma grande gama de circuitos possíveis para simulação, além da linha de transmissão com carga.

A ferramenta consiste em vários menus de simulação de circuitos, que podem ser ativos (detector de envoltória, circuitos BIAS) ou passivos (microfitas, cabo coaxial, balun). Para análise em alta frequência, um bom uso é a simulação em microfita. Passando os parâmetros da microfita (largura do dielétrico e do condutor, largura e comprimento do condutor, material do substrato e frequência de operação), são fornecidas as propriedades da microfita (tais como a impedância característica, o comprimento de onda e a velocidade de fase). A Figura 11 mostra a interface para simulação em microfita.

Calculate Z0 [F4]

W → 12

H → 6

ϵ_r

T 2.1

1000

L

Dielectric: $\epsilon_r =$ 2.84

Nylon™

Frequency: 25 GHz

Length Units: mils

Z0 = 54.44 Ω

Elect Length = 3.143 λ

Elect Length = 1131.6 degrees

1.0 Wavelength = 318.137 mil

Vp = 0.674 fraction of c

ϵ_{eff} = 2.202

W/H = 2.000

Figura 11 – Interface AppCAD para simulação em microfita

Esta ferramenta é mais adequada para a simulação dos circuitos pré-existent (do tipo “passar parâmetros e dar resultados”). Caso haja necessidade de se simular circuitos mais

específicos ou customizados, a ferramenta não é recomendada. Portanto, o AppCAD sofre do mesmo problema de limitação de aplicações que o WinTLS, embora ofereça mais possibilidades de simulação que este.

2.3. FERRAMENTA SERENADE SV 8.5

O software Serenade SV (Versão para Estudantes) é uma ferramenta gratuita de projeto e simulação, desenvolvida pela Ansoft Corporation® (embora esta versão esteja desatualizada e não seja mais oferecida pela empresa). A versão para estudantes é mais limitada que a versão comercial, possuindo apenas o Simulador de Circuitos *Harmonica*, enquanto que a versão normal possui também o Simulador de Circuitos *Symphony*. Apesar disso, o software serve bem aos propósitos desse projeto.

Essa ferramenta é uma das poucas analisadas que podem ser efetivamente utilizadas tanto para projeto como para simulação de circuitos de alta frequência. Ela permite o projeto de circuitos específicos de maneira gráfica (o que a torna mais intuitiva) e sua conseqüente simulação.

De maneira geral, as principais funcionalidades do Serenade SV consistem em montar circuitos graficamente com componentes primários ou sub-circuitos (símbolos), definir as variáveis e as frequências de simulação, exibir os resultados (em especial os parâmetros S) de forma gráfica (diagrama de perdas, Carta de Smith) ou numérica (valores de cálculo iterativo) e ainda, otimizar os valores das variáveis para determinadas condições. A Figura 12 mostra a interface principal do software.

Outro ponto interessante que facilita o trabalho do projetista é a existência de módulos de controle para cada uma das funcionalidades no próprio desenho do circuito. A Figura 13 mostra alguns módulos de controle usados no projeto. Cada um desses módulos possui diversos campos que podem ser preenchidos com valores à escolha do projetista. Mais detalhes sobre esses módulos serão vistos no **Capítulo 3** desse projeto, com a realização de exemplos.

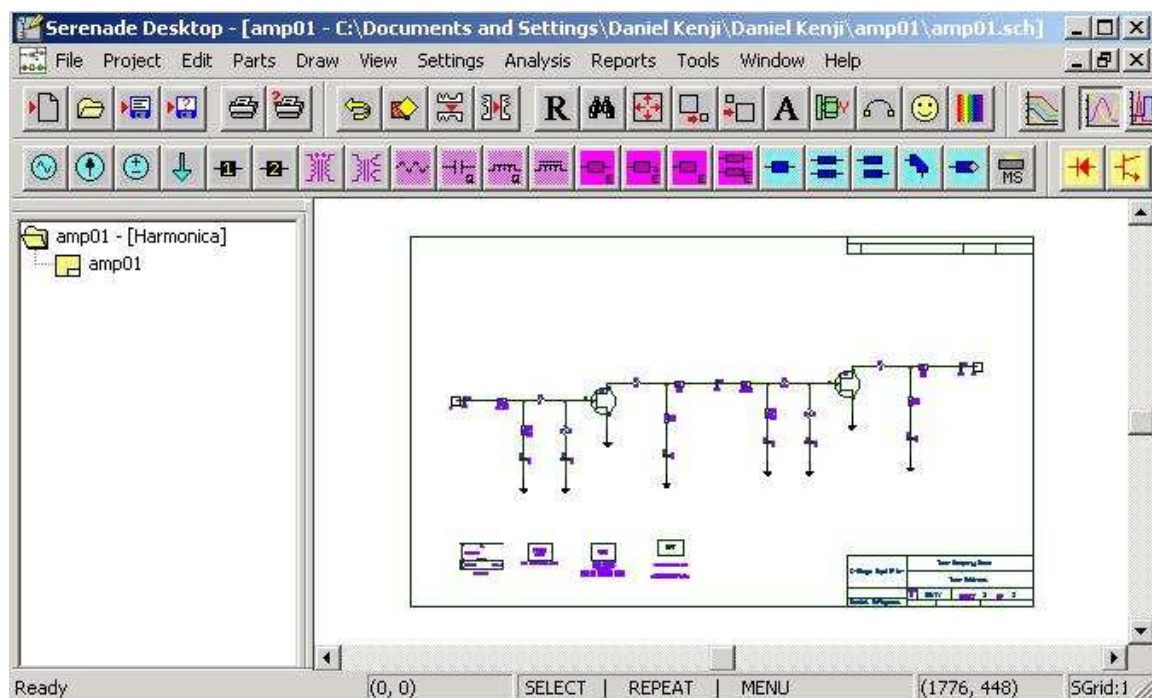


Figura 12 – Interface do Serenade SV 8.5

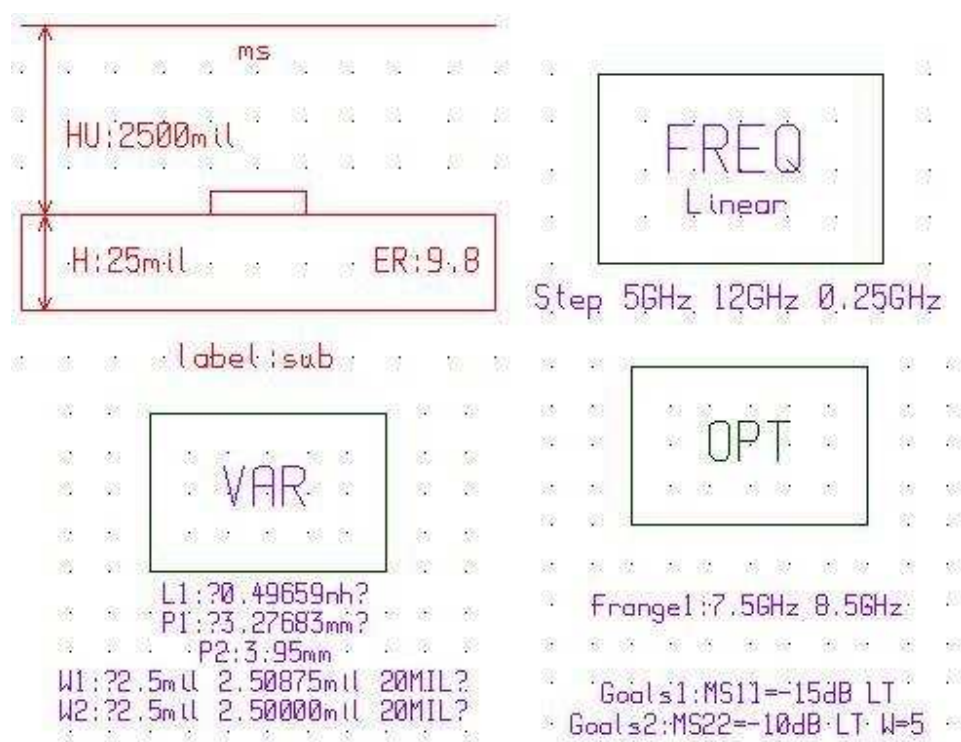


Figura 13 – Módulos de controle do Serenade SV 8.5

Este software é bastante versátil exatamente por permitir a construção de circuitos e permitir a utilização de esquemas hierarquizados, isto é, reutilização de sub-circuitos (símbolos). Ele é, portanto, altamente recomendado para projetos mais complexos, que demandem grande número de parâmetros e componentes.

2.4. FERRAMENTA ANSOFT DESIGNER SV 2.2.0

O software Ansoft Designer SV (Versão para Estudantes) é uma ferramenta gratuita de projeto e simulação, também desenvolvida pela Ansoft Corporation®, sendo uma alternativa ao Serenade SV. Assim como no Serenade, a versão para estudantes é mais limitada que a versão paga. Entretanto, no caso do Ansoft, essas limitações são ainda maiores, pois a versão para estudantes não possui suporte para, por exemplo, simulações não-lineares, ao passo que o Serenade possui. Essas restrições acabam por diminuir a versatilidade do Ansoft em relação ao Serenade.

A Figura 14 mostra a interface principal do software.

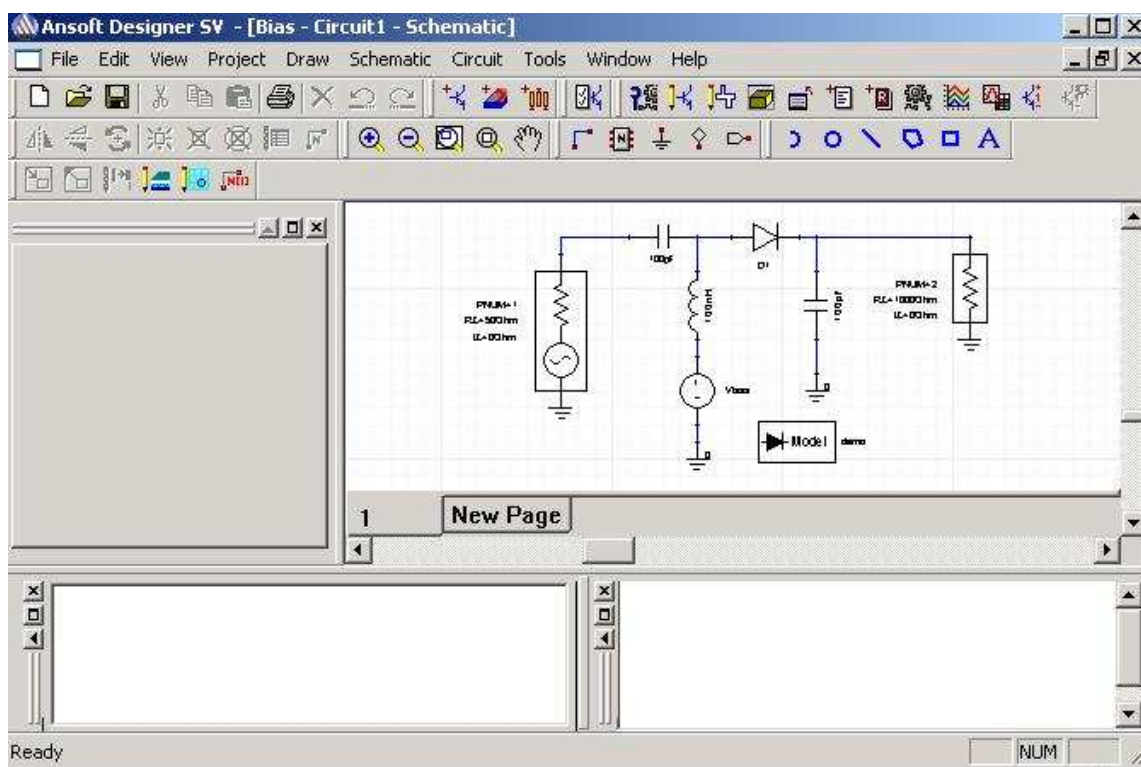


Figura 14 – Interface do Ansoft Designer SV 2.2.0

Entretanto, uma funcionalidade interessante, existente apenas no Ansoft Designer, é a interface para projeto de filtros. A Figura 15 mostra essa interface, exibindo toda a gama possível de projetos de filtros (Chebyshev, Bessel, Gaussiano...), além de vários outros parâmetros (tipo de filtro, fator de qualidade, ripple...). Esta interface oferece também as dimensões do filtro implantado em microfita.

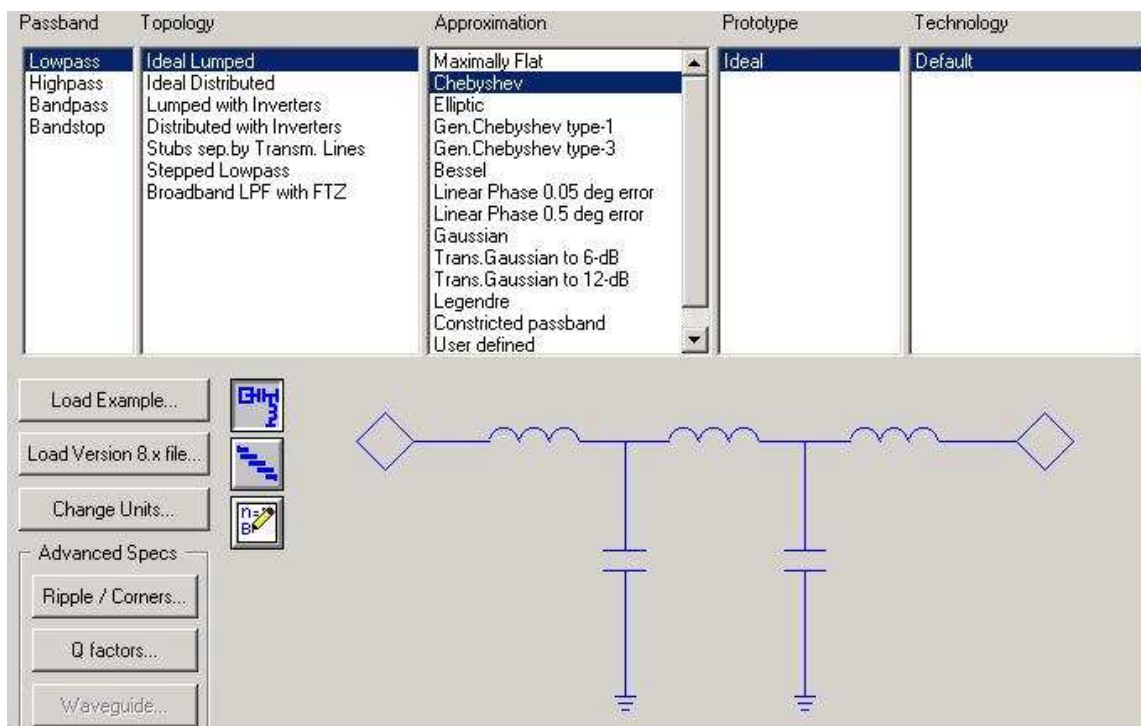


Figura 15 – Interface do Ansoft Designer SV para projeto de filtros

3. AVALIAÇÃO DOS SOFTWARES

3.1. MODO DE AVALIAÇÃO

Este projeto listou quatro softwares em versão gratuita para análise de circuitos de alta frequência. Desses, apenas dois (Serenade SV e Ansoft Designer SV) são versáteis o bastante para projetar e simular circuitos específicos. Portanto, este capítulo mostrará exemplos de utilização apenas desses dois softwares. Os exemplos consistem na construção, simulação e apresentação dos resultados de determinados circuitos e comparando diversos critérios, como facilidade de uso, versatilidade e conhecimento prévio necessário.

3.2. PROJETO DE FILTRO PASSA-BAIXAS

Este primeiro exemplo consiste no projeto de um filtro passa-baixas com as especificações mostradas na Tabela 7. A escolha de um projeto de filtro como modo de avaliação visa utilizar também a interface específica do Ansoft Designer SV para filtros.

Tabela 7 – Especificações do filtro passa-baixas

Característica da curva de transmissão	Chebyshev
Frequência de corte (GHz)	5,0 (ou $\omega = 3,1415\text{E}+10$ rad/s)
Ripple (dB)	0,1
Impedância de entrada (Ω)	50
Impedância de saída (Ω)	50
Ordem do filtro (nº de componentes)	5
Característica especial	Primeiro elemento em série (Modelo T)

3.2.1. PROJETO DE FILTRO COM O SERENADE SV

Como a versão para estudantes do software Serenade não oferece uma interface específica para projeto de filtros, então, para construir o circuito de simulação, é necessário antes fazer alguns cálculos manuais e usar algumas tabelas.

Utilizando-se uma tabela de valores de componentes (resistências, indutâncias e capacitâncias) para um filtro Chebyshev normalizado com 0,1dB de ripple (vide seção **Anexos**), pode-se estimar o protótipo do filtro. A Figura 16 mostra como é estrutura inicial do filtro passa-baixas, modelo T, com cinco componentes.

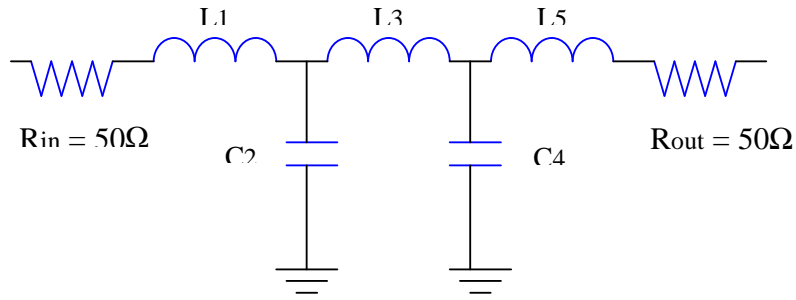


Figura 16 – Estrutura inicial de um filtro passa-baixas de ordem 5

Com os valores da tabela citada (L_1' , C_2' , L_3' , C_4' e L_5'), pode-se calcular os valores de L_1 , C_2 , L_3 , C_4 e L_5 .

$$L_1 = \frac{50 \times L_1'}{\omega} = \frac{50 \times 1,1468}{3,1415 \times 10^{10}} = 1,825 \times 10^{-9} H$$

$$C_2 = \frac{C_2'}{50 \times \omega} = \frac{1,3712}{50 \times 3,1415 \times 10^{10}} = 8,792 \times 10^{-13} F$$

$$L_3 = \frac{50 \times L_3'}{\omega} = \frac{50 \times 1,9750}{3,1415 \times 10^{10}} = 3,1415 \times 10^{-9} H$$

$$C_4 = \frac{C_4'}{50 \times \omega} = \frac{1,3712}{50 \times 3,1415 \times 10^{10}} = 8,792 \times 10^{-13} F$$

$$L_5 = \frac{50 \times L_5'}{\omega} = \frac{50 \times 1,1468}{3,1415 \times 10^{10}} = 1,825 \times 10^{-9} H$$

Construindo o circuito acima já com os valores incluídos na interface do Serenade SV, obtêm-se os gráficos de variação dos parâmetros de espalhamento S11 e S21 em função da frequência, conforme mostra a Figura 17.

O filtro passa-baixas funciona aproximadamente como esperado (com frequência de corte de 5-6 GHz), com o parâmetro S11 aumentando conforme se aumenta a frequência de operação (pois ele corresponde à onda refletida na entrada) e o parâmetro S21 diminuindo ao mesmo tempo (pois ele corresponde à onda que atravessa o filtro). Para se achar os parâmetros S22 e S12, bastaria inverter os valores de resistência de entrada e de saída. Como os valores são os mesmos para esse exemplo, as curvas permanecerão as mesmas.

Apesar dos resultados, seria mais interessante que o próprio software fizesse os cálculos dos componentes. No software Ansoft Designer SV, a interface específica para projeto de filtros resolve este inconveniente.

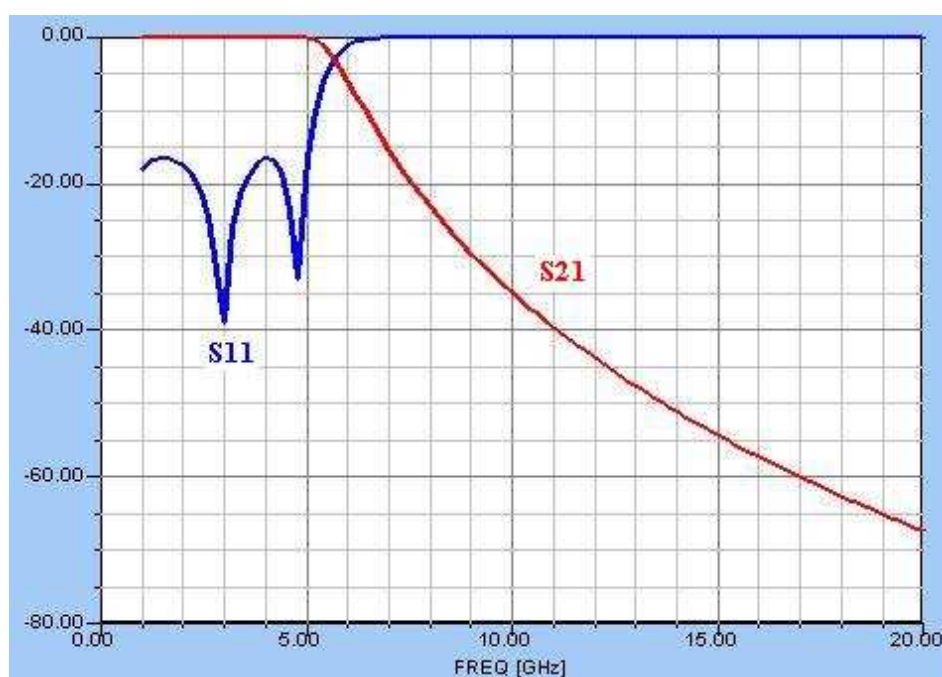


Figura 17 – Parâmetros (S) X Frequência (Serenade SV)

3.2.2. PROJETO DE FILTRO COM O ANSOFT DESIGNER SV

Através da interface específica para projeto de filtros do Ansoft Designer SV (mencionada no item 2.4), a tarefa de se desenvolver um filtro com as especificações desejadas torna-se muito mais fácil. Bastando entrar na interface dita com os valores especificados, obtém-se o esquema de filtro e as curvas dos parâmetros S11 e S21 mostrados na Figura 18.

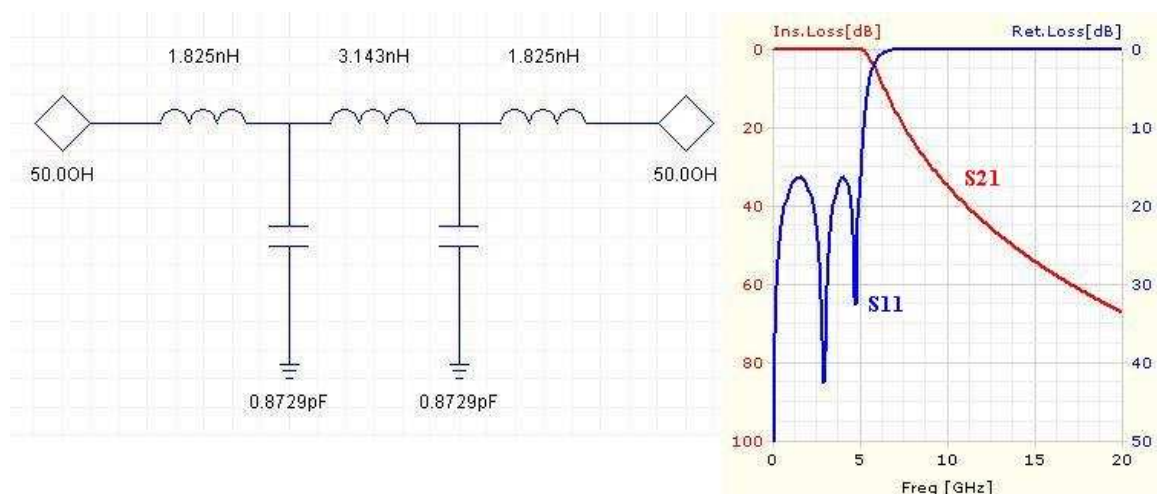


Figura 18 – Filtro protótipo e curvas dos parâmetros (S) (Ansoft Designer SV)

Há uma outra maneira de se obter as curvas dos parâmetros S11 e S21, construindo o filtro manualmente ao invés de usar a interface. Usando-se a própria interface para projeto de circuitos (calculando os valores dos componentes previamente como feito no Serenade SV), monta-se o circuito e obtêm-se as curvas dos parâmetros S11 e S22 mostradas na Figura 19, que são praticamente iguais aos plotados anteriormente.

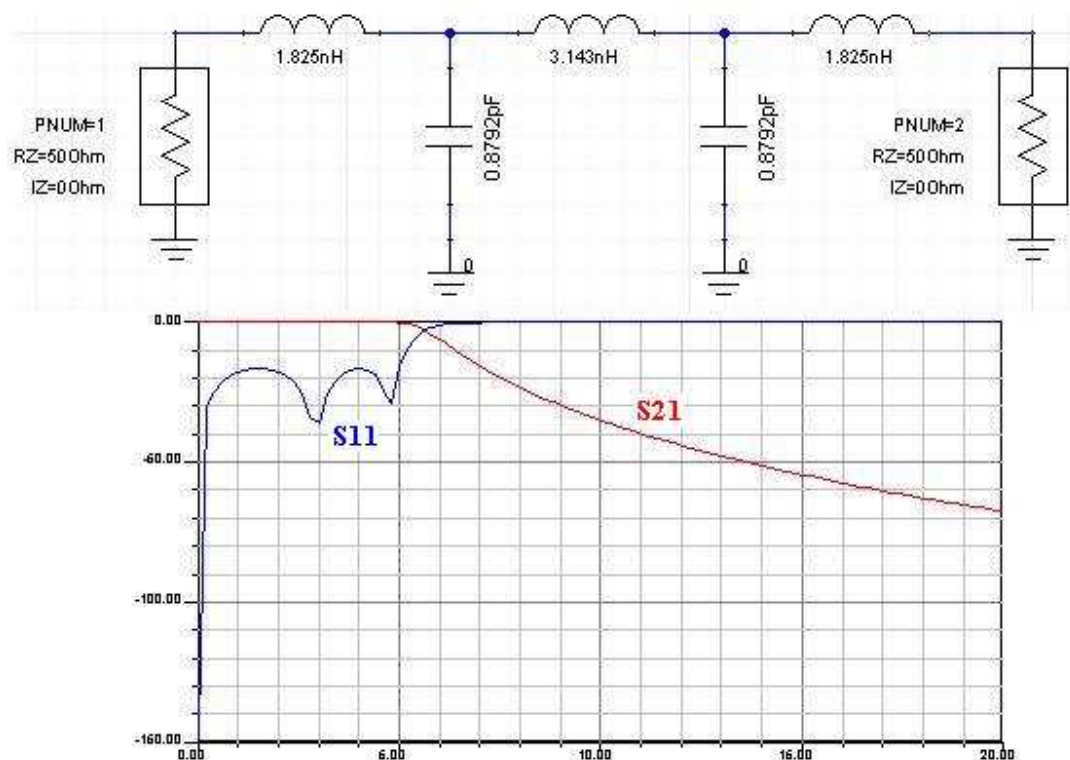


Figura 19 – Circuito montado do filtro e curvas dos parâmetros (S)

Essa maneira de projeto do filtro não é muito interessante, pois em nada difere do Serenade SV (exige-se o cálculo manual dos componentes). A primeira maneira é mais rápida e não exige muito conhecimento do software. Entretanto, caso houvesse necessidade de se projetar circuitos mais complexos ou que não fossem filtros, então o mais interessante seria usar essa segunda maneira ou então o Serenade.

3.3. PROJETO DE AMPLIFICADOR DE 2 ESTÁGIOS

Este outro exemplo consiste no projeto de um amplificador de 2 estágios com baixo ruído, que nada mais é que um circuito para casamento de impedância de um transistor FET. O exemplo consiste também em otimizar as dimensões das impedâncias usadas no casamento usando as funcionalidades do programa. Como a possibilidade de otimização existe apenas no Serenade, o exemplo será feito apenas para esta ferramenta.

3.3.1. PROJETO DE AMPLIFICADOR COM O SERENADE SV

O primeiro passo é montar o amplificador usando componentes básicos (resistências, capacitâncias, indutâncias e impedâncias), mais ou menos como mostrado na Figura 20. Os componentes indicados na Figura 20 são aqueles cujos valores de indutância e de dimensões deseja-se otimizar.

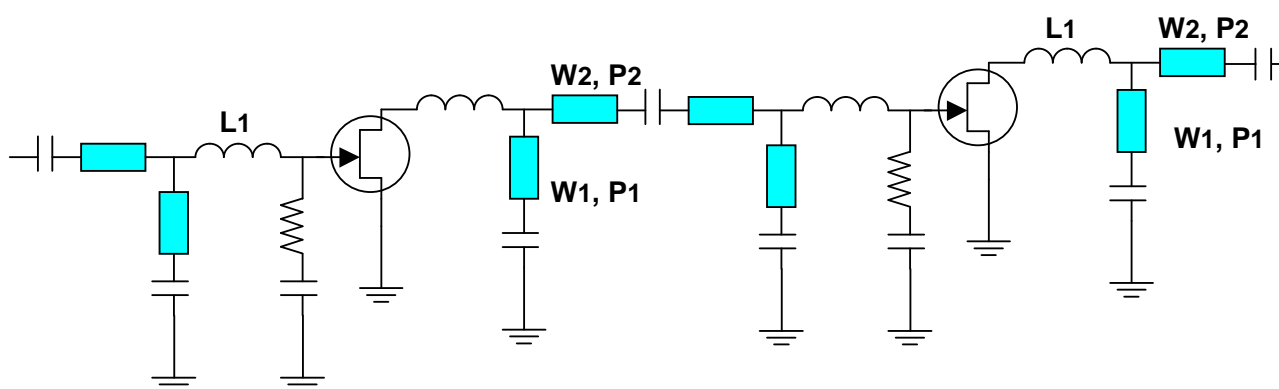
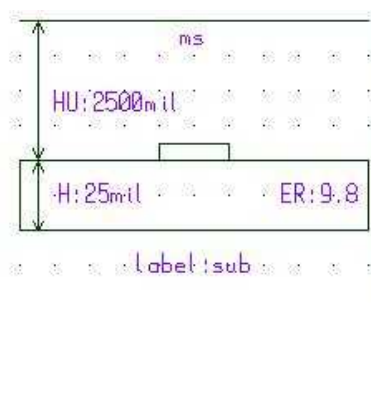


Figura 20 – Amplificador de 2 estágios


Uma vez terminado o circuito, devem ser inseridos os módulos de controle para permitir a simulação do amplificador. Os parâmetros desejados para cada módulo são mostrados e explicados nas Figuras 21, 22, 23 e 24.



	Property	Value	Visible
1	H	25mil	All
2	ER	9.8	All
3	HU	2500mil	All
4	Tanm		Nothing
5	RGH		Nothing
6	Msat		Nothing
7	label	sub	All
8	Met1	Ni 10um	Nothing
9	Met2	Cu 5um	Nothing
10	Met3		Nothing
11	Mrem		Nothing
12	TAND	0.0001	Nothing
13	RS		Nothing

Figura 21 – Módulo de controle do substrato

Os parâmetros passados para o módulo do substrato na Figura 21 indicam que o dielétrico usado tem constante dielétrica relativa 9,8 (óxido de alumínio), espessura de 25 milésimos de polegada e que os condutores são compostos de níquel e cobre.



	Property	Value	Visible
1	Freq	Step 5GHz 12GHz 0.25GHz	Value
2	gd	*on/off*	Nothing
3	pert	*opt*	Nothing
4	option	*s/vg*	Nothing
5	Freq1		Value
6	Freq2		Value
7	Freq3		Value
8	Freq4		Value
9	Freq5		Value
10	Freq6		Value
11	Freq7		Value
12	Freq8		Value
13	Freq9		Value

Figura 22 – Módulo de controle da frequência

Os parâmetros passados para o módulo da frequência na Figura 22 indicam que a frequência de simulação varia de 5GHz até 12GHz, com passos de 250MHz.

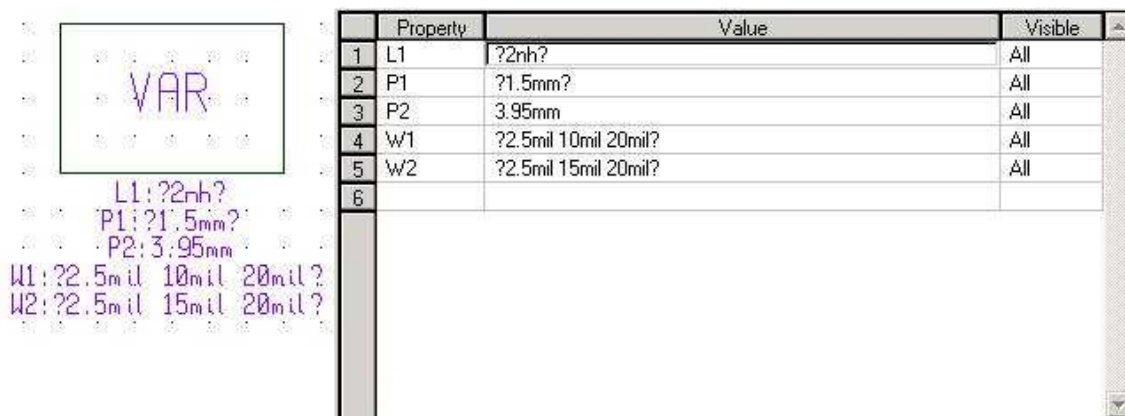


Figura 23 – Módulo de controle das variáveis

Os parâmetros passados para o módulo de variáveis na Figura 23 indicam que os parâmetros a serem variados são L1, P1, W1 e W2, mantendo P2 fixo. A variável L representa o valor das indutâncias e as variáveis W e P representam, respectivamente, a largura e o comprimento das impedâncias indicadas na Figura 20. É importante ressaltar que os valores fornecidos às variáveis são valores iniciais e são alterados após a otimização (em W1 e W2, o valor inicial corresponde ao valor do meio, os outros dois valores são os limites de variação).



Figura 24 – Módulo de otimização das variáveis

Os parâmetros passados para o módulo de otimização na Figura 24 indicam que a frequência para os quais as variáveis serão otimizadas varia de 7,5GHz a 8,5GHz, e que o objetivo da otimização (nesse caso, para que o valor máximo de S11 seja -15dB e para que o valor máximo de S22 seja -10dB, com peso 5).

Terminada a inserção dos módulos de controle, pode-se finalmente simular a resposta do circuito, como mostrado na Figura 25, onde aparecem as curvas dos parâmetros S11, S21 e S22.

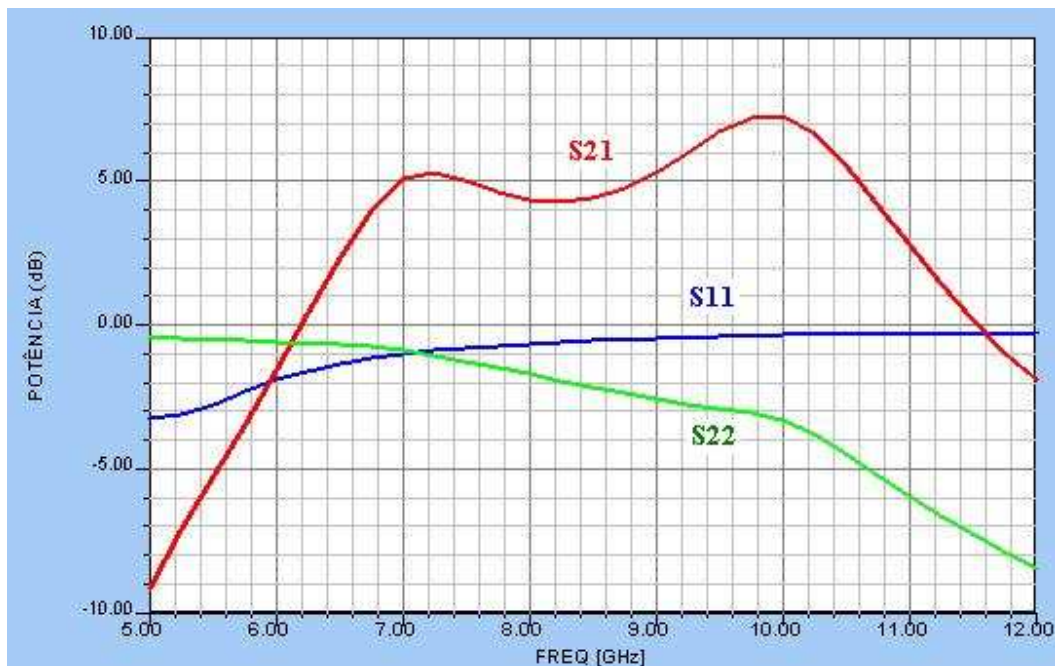


Figura 25 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 do amplificador

Para a otimização das variáveis, foram testadas 130 iterações para cada modo: Gradient, Random, Minimax e Lev-Marq, com atualizações a cada 10 iterações, na interface para otimização do Serenade SV. Entre cada modo de otimização as variáveis foram reiniciadas para os valores mostrados na Figura 23. Os resultados e as conclusões de performance para cada modo são mostrados nas Figuras 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33.

O modo de otimização Gradient foi o que apresentou maior tempo de resposta (21 segundos), mas também foi o que demonstrou os melhores valores de otimização. Pela Figura 26 nota-se que os valores de impedância e de dimensões dos componentes foram alterados em relação aos mostrados na Figura 23. Estes são os valores ótimos encontrados pelo Serenade e poderiam ser ainda mais refinados, caso fosse do interesse do projetista prosseguir com mais iterações. O resultado é mostrado na Figura 27: o parâmetro S21 atinge valor máximo acima de 20dB e os parâmetros S11 e S22 atingem valores mínimos dentro da faixa de frequência desejada.

O modo de otimização Random foi o que apresentou o segundo maior tempo de simulação (8 segundos) e também o que demonstrou os piores resultados: os valores de impedância e de dimensões dos componentes mostrados na Figura 28 não foram suficientes para elevar o parâmetro S21 para mais de 20dB e nem minimizar o parâmetro S11 para menos de -10dB, conforme visto na

Figura 29. Os valores poderiam ser ainda mais refinados, caso desejasse prosseguir com as iterações.

O modo de otimização Minimax encerrou-se automaticamente após 46 iterações, pois chegara a um mínimo local, com tempo de processamento próximo a 1 segundo, conforme Figura 30. Os resultados foram melhores que o obtido no modo Random (e mais rápidos), mas ainda longe dos obtidos no modo Gradient, como pode ser observado na Figura 31: o parâmetro S21 ultrapassa 20dB em seu máximo, mas os parâmetros S11 e S22 não chegam a -10dB em seu mínimo.

De todos os modos, o modo Lev-Marq foi o que apresentou melhor relação resultado-tempo: a Figura 32 mostra que seu tempo de processamento foi próximo de zero, chegando a um mínimo relativo após 7 iterações, e com resultados próximos ao obtido no modo Gradient. Pela Figura 33, percebe-se que o máximo de S21 ultrapassa 20dB na faixa entre 7,5 e 8,5 GHz, ao mesmo tempo que S11 chega próximo de -20dB e S22 ultrapassa -10dB. Portanto, esse é o modo mais eficiente em termos de otimização.

Percebe-se, portanto, que embora seja trabalhosa, essa funcionalidade do Serenade SV é de grande utilidade, o que lhe dá uma grande vantagem sobre o Ansoft Designer SV.

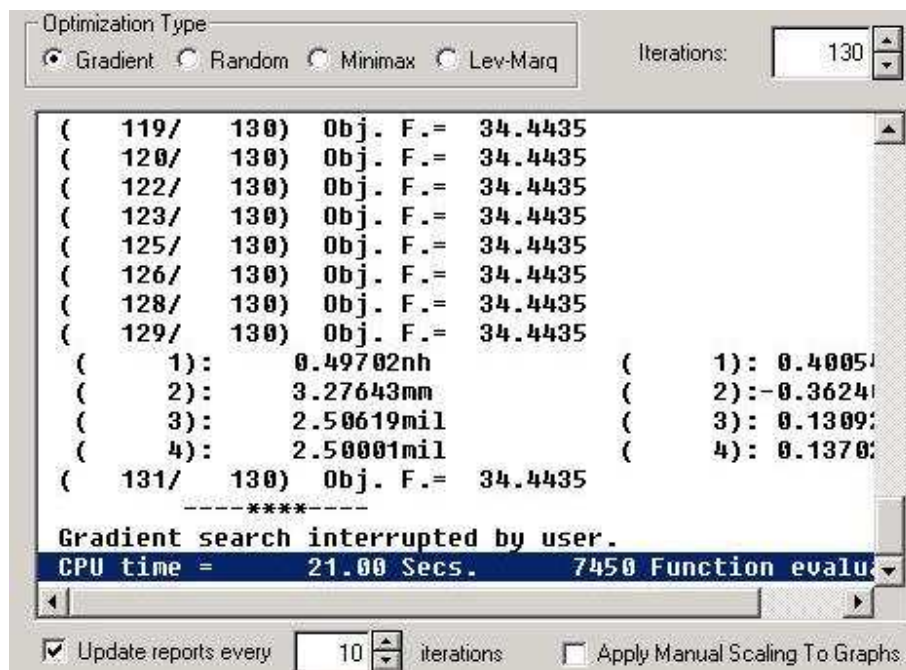


Figura 26 – Interface de otimização do modo Gradient

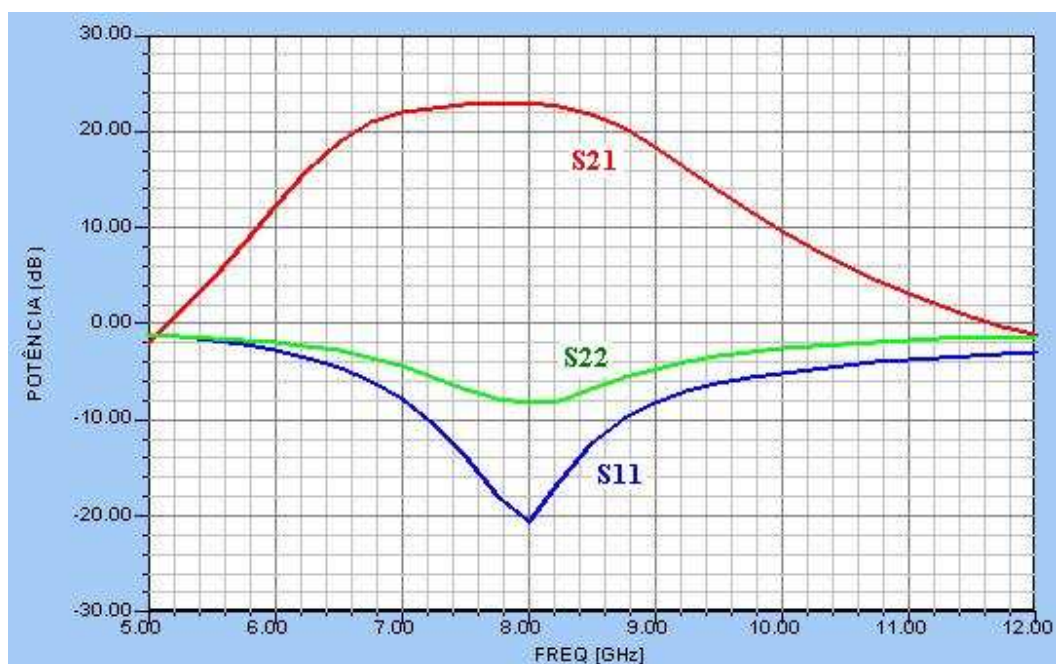


Figura 27 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Gradient

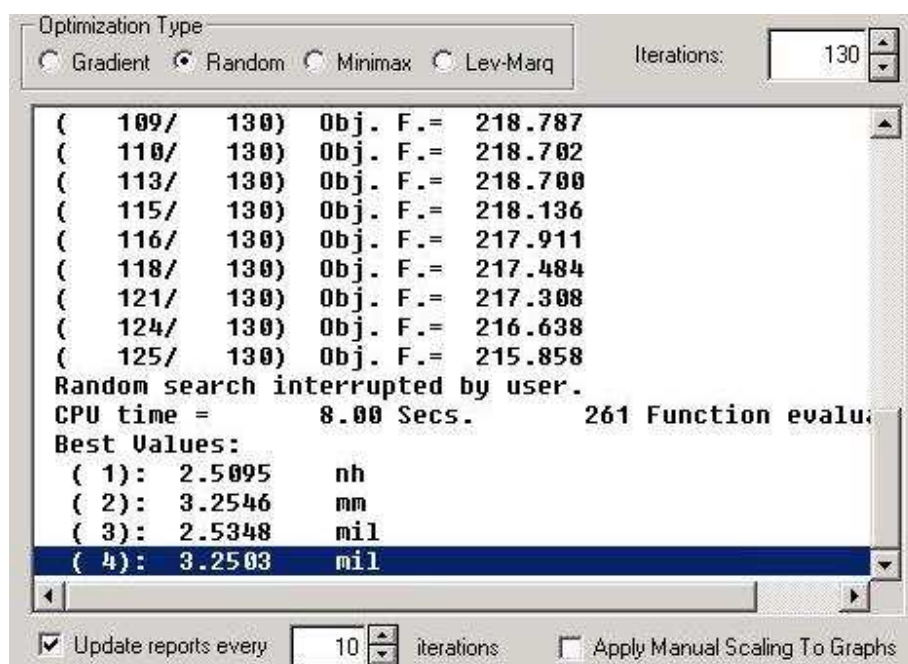


Figura 28 – Interface de otimização do modo Random

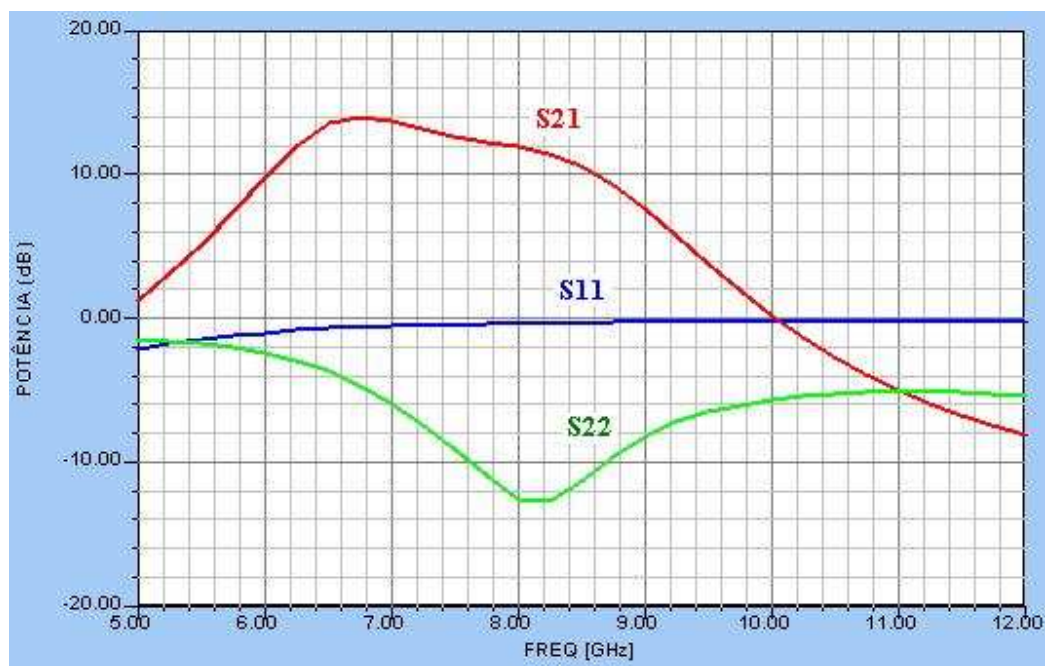


Figura 29 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Random

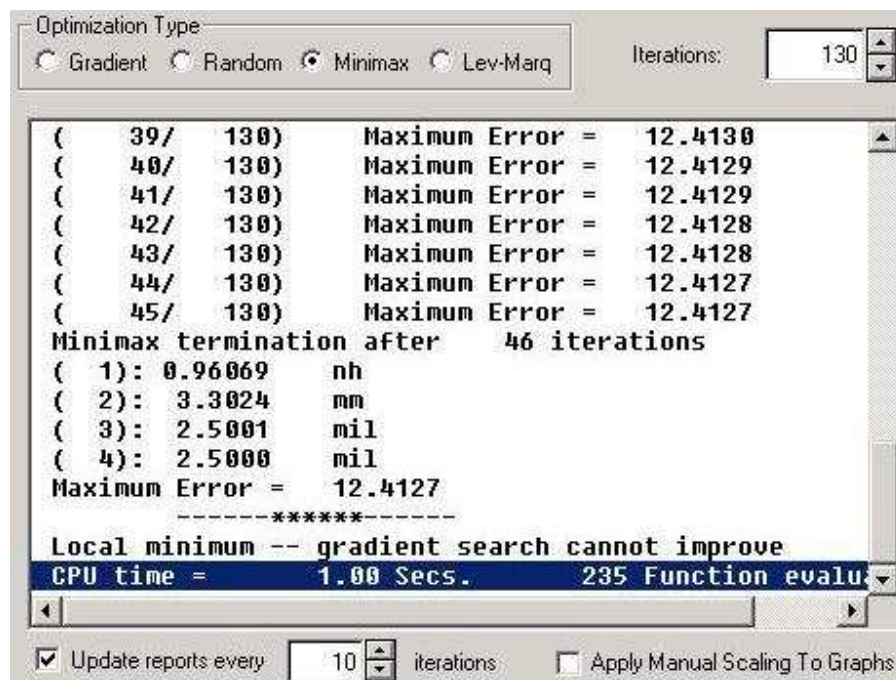


Figura 30 – Interface de otimização do modo Minimax

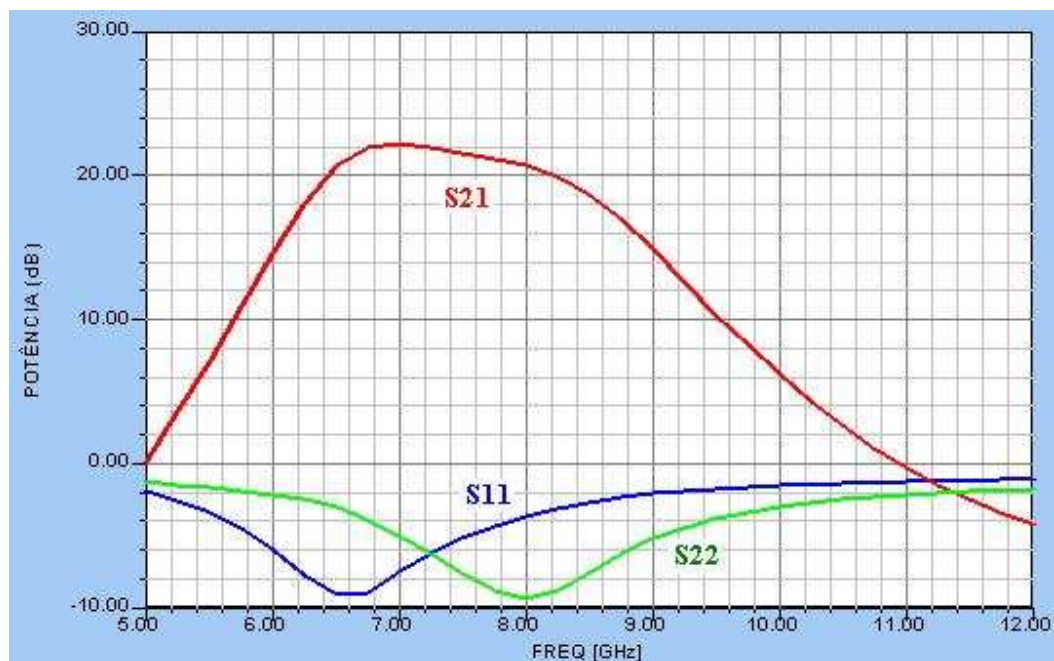


Figura 31 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Minimax

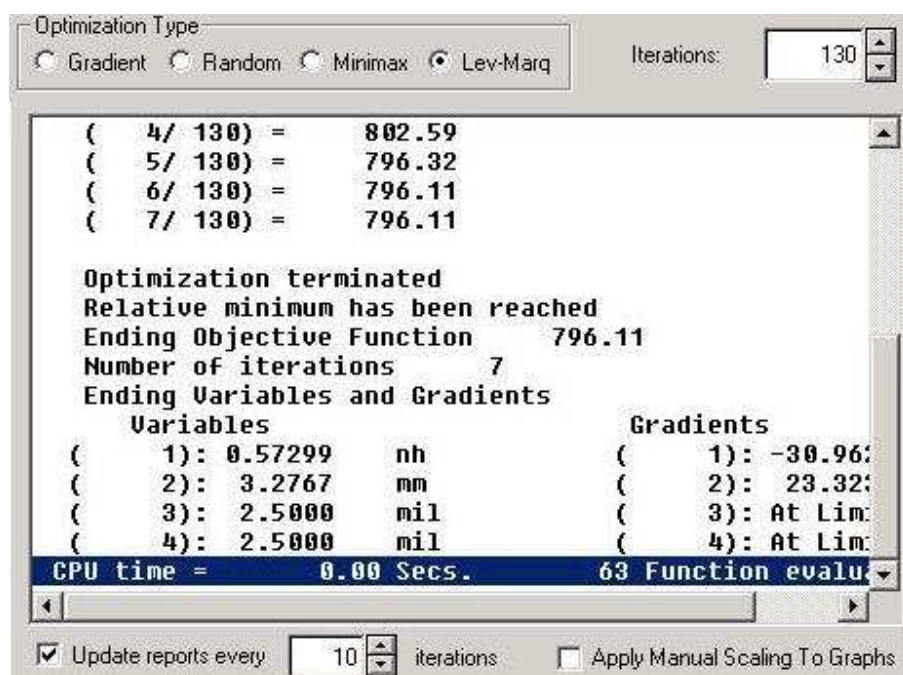


Figura 32 – Interface de otimização do modo Lev-Marq

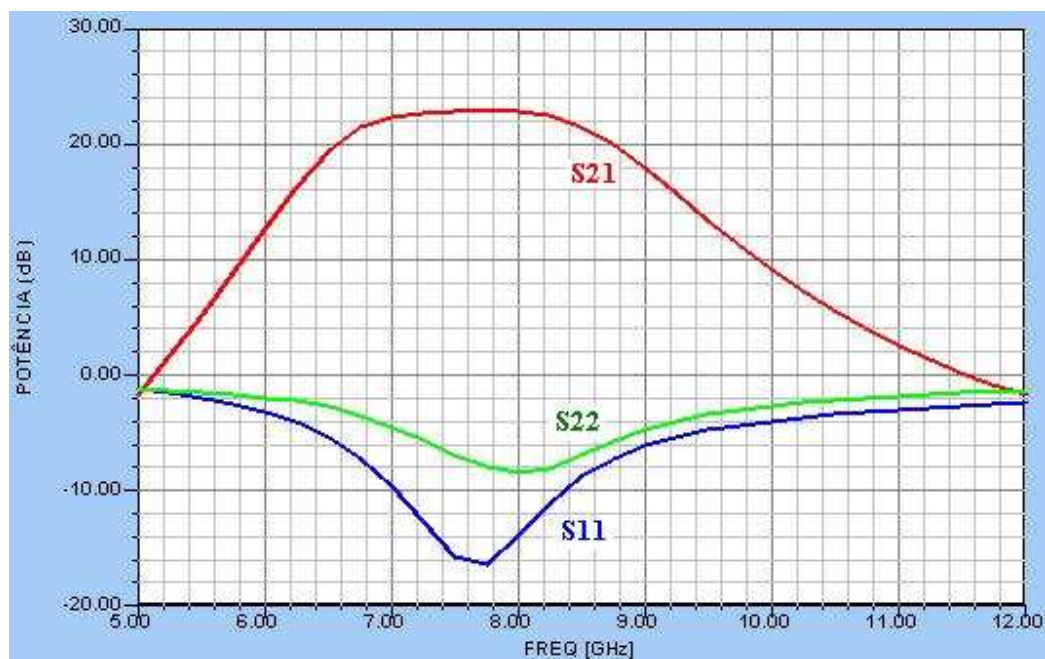


Figura 33 – Curvas dos parâmetros S11, S21 e S22 otimizados no modo Lev-Marq

4. CONCLUSÕES

A realização do trabalho de conclusão possibilitou ao aluno de graduação colocar em prática parte dos conhecimentos teóricos aprendidos durante o curso, além de adquirir experiência na utilização de diversas ferramentas de simulação de circuitos em alta frequência. Trata-se de um aprendizado de suma importância, dado que para compreensão e análise de tecnologias cada vez mais complexas que utilizam rádio-frequência (*wireless*, por exemplo), o conhecimento dessas ferramentas se revela um poderoso aliado.

A importância dos conhecimentos teóricos também se revelou de grande valor, uma vez que para a plena compreensão dos resultados fornecidos pelas ferramentas depende de uma gama de conceitos aprendidos *a priori* em aula.

Como contribuição do trabalho, espera-se que este auxilie nas decisões dos projetistas que vierem a estudá-lo, quanto à escolha do melhor software a ser utilizado em seus projetos, comparando critérios como praticidade, limitações e custo. Através dos exemplos mostrados, pode-se também sugerir um uso a cada software em determinadas disciplinas acadêmicas:

- WinTLS – usado primordialmente para testar casamento de impedância, é recomendado para a disciplina de Ondas Eletromagnéticas.
- AppCAD – usado primordialmente para calcular as características de circuitos comuns no estudo das Telecomunicações, é recomendado para as disciplinas de Princípios de Comunicação, Antenas e Microondas.
- Serenade SV – particularmente versátil devido à possibilidade de projetar circuitos específicos (como o filtro passa-baixas e o amplificador de dois estágios mostrados), é recomendado para as disciplinas de Microondas e Sistemas de Comunicação.
- Ansoft Designer SV – também bastante versátil como o Serenade, destaca-se pela sua interface para projeto de filtros, utilizada para construir o filtro passa-baixas mostrado anteriormente. Recomendado para disciplinas de Microondas, Sistemas de Comunicação e Sistemas Digitais.

A contribuição do Curso de Engenharia de Computação, Ênfase em Telecomunicações e Computação Móvel, teve valor inestimável para as formações profissional e pessoal futuras do aluno graduando. Foi também somente através da combinação de teorias e práticas adquiridas durante o curso que se tornou possível a realização desse trabalho.

5. ANEXOS

Tabela de valores de componentes para um filtro Chebyshev normalizado com 0,1dB de ripple e razão entre resistências de entrada e saída igual a 1 [WEINBERG, 1957]

Ordem	C1 ou L1'	L2 ou C2'	C3 ou L3'	L4 ou C4'	C5 ou L5'	L6 ou C6'	C7 ou L7'	L8 ou C8'	C9 ou L9'
1	0,3052								
2	-----	-----							
3	1,0316	1,1474	1,0316						
4	-----	-----	-----	-----					
5	1,1468	1,3712	1,9750	1,3712	1,1468				
6	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
7	1,1812	1,4228	2,0967	1,5734	2,0967	1,4228	1,1812		
8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
9	1,1957	1,4426	2,1346	1,6167	2,2054	1,6167	2,1346	1,4426	1,1957
10	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CÉSAR, A.C. **Microondas 1: Parâmetros de espalhamento**. Notas de aula, Disciplina *Microondas*. São Carlos, EESC – USP, 2004.
- [2] GONZALEZ, G. **Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design**. Prentice Hall, 1997.
- [3] GUPTA, K.C. GARG, R. CHADHA, R. **Computer-Aided Design of Microwave Circuits**. Artech House, EUA, 1981.
- [4] **Serenade® Design Environment: Getting Started Manual 8.5 Student Version**. Ansoft New Jersey, 2000.
- [5] WEINBERG, L. **Additional tabels for design of optimum ladder networks**. J.F.I., parte I, pág. 7-24, julho de 1957 e parte II, pág. 127-137, agosto de 1957.