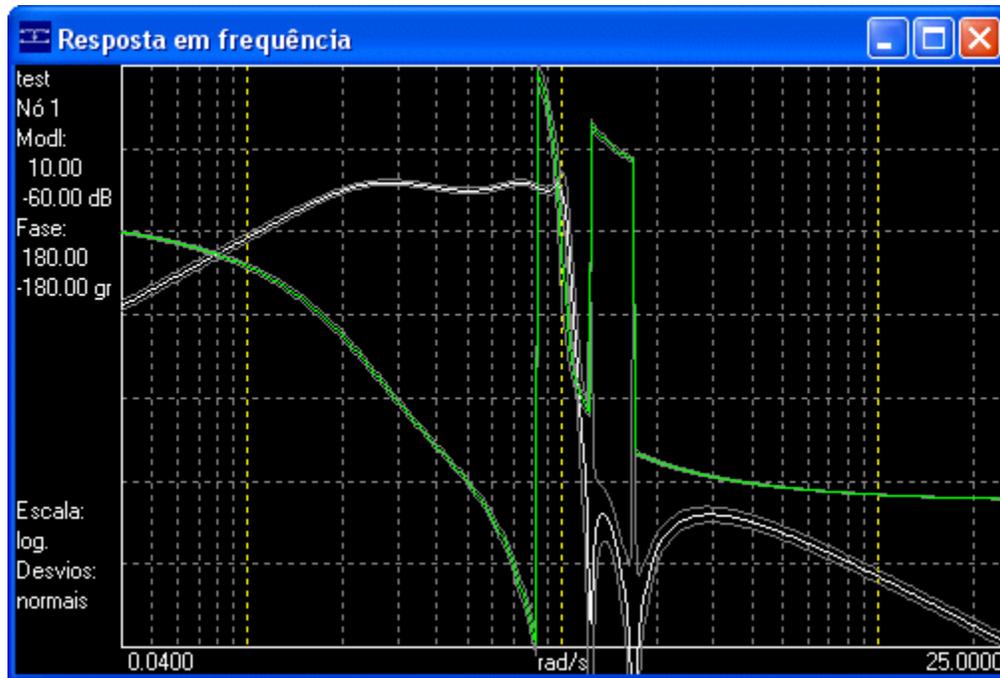


## O Programa SENSI

Documentação válida para a versão 1.1 para Windows (Sensiw).



Janela de resposta em frequência.

### 1 - Introdução

O programa SENSI analisa circuitos lineares e invariantes no tempo, utilizando uma forma compacta da análise nodal modificada, e o método da rede adjunta para a análise de sensibilidades. Da análise podem ser obtidos:

- Módulo fase e atraso de grupo de uma função de transferência.
- Sensibilidades.
- Desvios estatísticos de módulo e fase.
- Sensibilidades de polos e zeros.
- Desvios estatísticos de polos e zeros.
- Análise de faixa dinâmica.

#### 1.1 – Instalação

Apenas copie o programa executável para um diretório adequado. Para desinstalar, apenas remova o arquivo.

### 2 - Parâmetros de entrada para o programa

O programa lê a descrição do circuito a analisar em um “netlist” em arquivo de texto, organizado na forma:

- Primeira linha: número de nós.
- Linhas seguintes: descrição (netlist), um elemento por linha:

- Resistor com resistência R:  
R<nome> <nó1> <nó2> <R>

- Indutor com indutância L:  
L<nome> <nó1> <nó2> <L>

- Capacitor com capacitância C:  
C<nome> <nó1> <nó2> <C>

- Fonte de tensão controlada a tensão (VCCS), com ganho Av:  
E<nome> <nóVo+> <nóVo-> <nóVi+> <nóVi-> <Av>

- Fonte de corrente controlada a corrente (CCCS), com ganho Ai:  
F<nome> <nóIo+> <nóIo-> <nóIi+> <nóIi-> <Ai>

- Fonte de corrente controlada a tensão (VCCS), com transcondutância Gm e transcondutância de modo comum (opcional) Gc:  
G<nome> <nóIo+> <nóIo-> <nóVi+> <nóVi-> <Gm> [<Gc>]

- Fonte de tensão controlada a corrente (CCVS), com transresistência Rm:  
H<nome> <nóVo+> <nóVo-> <nóIi+> <nóIi-> <Rm>

- Girador, com resistência de giração Rg:  
Y<nome> <nó1+> <nó1-> <nó2+> <nó2-> <Rg>

- Amplificador operacional ideal, modelo nullator-norator:  
O<nome> <nó entr. 1> <nó entr. 2> <nó saída>

Ou, com a saída suspensa:  
O<nome><nó saída 1><nó saída 2> <nó entr. 1> <nó entr. 2>

- Amplificador operacional, com ganho GB/s (GB em rad/s) e resistência de saída Rout:  
A<nome> <nó-> <nó+> <nósaída> <GB> <Rout>

Ou, com a saída suspensa:  
A<nome><nó saída +><nó saída -> <nó entr. -> <nó entr. +> <GB> <Rout>

- Transistor bipolar, modelo híbrido h simplificado:  
Q<nome>, <nó c> <nó b> <nó e> <hfe> <hie> [<Cbe> <Cbc>]

- Transistor MOS com Gm e Gds:  
M<nome>, <nó d> <nó g> <nó s> <Gm> <Gds> [<Cgs> <Cgd>]

- Fonte de tensão de valor V com resistor em série Rs:  
Z<nome> <nó-> <nó+> <Rs> <V>

- Fonte de tensão de valor V:  
V<nome> <nó+> <nó-> <V>

- Fonte de corrente de valor I:  
I<nome> <nó+> <nó-> <I>

- Transformador de duas bobinas:  
K<nome> <nó1+> <nó1-> <nó2+> <nó2-> <L1> <L2> <k>

- Comentários:  
\*<texto>

-Comando (reservado para uso futuro):  
.<texto>

Todas as unidades em Ohms, Siemens, Farads e Henrys. O nó de terra é o nó 0. Os nomes devem possuir até 5 caracteres, incluindo a inicial que define o tipo. Os componentes podem estar em qualquer ordem e a numeração dos nós também, mas deve ser contínua, sem números faltando.

A descrição pode ser gerada pelo programa editor Edfil, a partir do diagrama esquemático do circuito.

### 3 - Resposta em frequência

Todos os cálculos referem-se às tensões nos nós do circuito, que equivalem a funções de transferência das entradas até aí.

O gráfico de resposta em frequência é plotado imediatamente após a leitura do arquivo de dados e a escolha do nó de saída, usando-se as escalas “default”, adequadas para circuitos normalizados em frequência. Junto com o nó de saída é pedido um nó da rede adjunta. Ele não afeta a análise, e sua tensão é apenas listada na

janela de sensibilidades. Os nós podem ser os da rede ou adicionais que representam correntes em fontes de tensão e curto-circuitos, na ordem dos elementos no “netlist”. O método usado pelo programa não calcula as correntes em fontes de tensão, mas os nós correspondentes existem na análise.

Outras escalas podem ser determinadas antes ou depois da plotagem dos gráficos, ou ajustadas interativamente durante a plotagem. Podem ser plotadas, em um único gráfico, curvas de módulo e fase da função de transferência, atraso de grupo e desvios estatísticos do módulo e da fase da função de transferência. Inicialmente, são plotadas apenas curvas de módulo, fase e desvio estatístico do módulo. Um cursor pode ser acionado a qualquer instante para leitura de valores no gráfico.

Várias teclas possuem função, ao final e durante a plotagem do gráfico:

- <, >: Ligam e movimentam o cursor.
- PgUp, PgDn: Idem, com passo maior.
- Q ou 5: Muda a curva selecionada pelo cursor.
- Del: Remove do gráfico a curva selecionada (e seleciona a de módulo).
- Ins: Recoloca no gráfico a curva selecionada.
- Setas verticais: Deslocam verticalmente (1/2 tela) a curva selecionada.
- + e -: Amplia ( $\times 2$ ) e reduz ( $\div 2$ ) o limite superior da curva selecionada.
- R: Amplia o limite superior de frequência, colocando no gráfico o que apareceria se a largura da área de plotagem fosse dobrada.
- A: Reduz o limite superior de frequência, colocando no gráfico o que apareceria se a largura da área de plotagem fosse a metade do que é.
- Setas horizontais: Movem as curvas em frequência de 1/2 tela.
- Return: Redesenha o gráfico, sem o cursor.
- Espaço: Mostra o cursor.
- E: Liga/desliga o traçado das curvas de módulo e fase com seus desvios estatísticos somados e subtraídos.
- G: Liga/desliga o traçado da grade (as escalas da grade sempre são as da curva selecionada, mesmo que ela esteja invisível).
- F: Liga/desliga o traçado de curvas de fase.
- T: Liga/desliga o traçado de curvas de atraso de grupo.
- B: Muda a posição do quadro de medida do cursor.
- S: Lista as sensibilidades na frequência do cursor.

Uma função “zoom”, aplicada à curva atualmente selecionada, pode ser acionada usando o mouse com movimento do canto superior esquerdo ao inferior direito. O botão direito do mouse posiciona o cursor na frequência correspondente.

Os valores calculados são sempre que possível aproveitados quando as escalas são mudadas. O cursor também não muda de frequência, se possível. Os gráficos somente serão totalmente recalculados se o nó de saída do circuito for mudado, se, no menu de escalas, o número de segmentos ou a escala de frequências for mudada, ou se o “zoom” com o mouse for usado. O número inicial de segmentos (pontos-1) no gráfico pode ser de até 1000.

As respostas em frequência para vários circuitos diferentes podem ser comparadas pelo programa CPSENSI, a partir das tabelas geradas pelo SENSI.

#### 4 - Listagens de sensibilidades

As sensibilidades  $S_x^T = \frac{x}{T} \frac{\partial T}{\partial x}$  da função de transferência  $T(s)$  em relação a todos os parâmetros  $x$  podem ser observadas após a plotagem de um gráfico. A parte real pode ser interpretada como sendo a sensibilidade do módulo da função de transferência em nepers e a parte imaginária como sendo a da fase em radianos. É listado também o valor de  $S_s^T$ , a sensibilidade da função de transferência em relação a “s”. A listagem se inicia pela frequência do cursor, e pode ser mudada com as setas horizontais acionadas pelo

mouse. A mudança se reflete no cursor do gráfico, se ele for redesenhado. As tensões nodais nos nós escolhidos das redes normal e adjunta são também listadas, para eventual verificação.

Os parâmetros que compõem os elementos com mais de um parâmetro (A, Q, M, G e K) são identificados nesta listagem e nas demais por:

- A<nome> - GB de um amp. op.
- a<nome> -  $R_{out}$  de um amp. op.
- Q<nome> - hfe de um transistor bipolar
- q<nome> - hie de um transistor bipolar
- M<nome> -  $G_m$  de um transistor MOS
- m<nome> -  $R_{ds}$  de um transistor MOS
- g<nome> - Transcondutância de modo comum de transcondutor
- K<nome> - Indutância mútua recíproca de um transformador,  $\Gamma_{12}=\Gamma_{21}$ .
- La<nome>, Lb<nome> - Inverso de indutância recíproca de um transformador,  $1/\Gamma_{11}$ ,  $1/\Gamma_{22}$ .

As capacitâncias dos transistores bipolares e MOS são apenas identificadas como Cbe, Cbc, Cgs e Cgd, e ficam nas listagens após o transistor correspondente.

## 5 - Análise da faixa dinâmica

Durante os cálculos para o traçado dos gráficos de resposta em frequência, os máximos e mínimos valores do módulo da função de transferência para cada nó da rede são computados. Os valores são acumulados enquanto os gráficos não forem totalmente recalculados.

## 6 - Desvios estatísticos

Os desvios estatísticos representam o erro que se deve esperar construindo o circuito com componentes com as variabilidades ou tolerâncias dadas, supondo não correlacionados os erros no valor dos parâmetros. Por exemplo, se X% dos parâmetros dos componentes usados possuírem menos que a variabilidade dada (com distribuição normal), X% dos circuitos que forem construídos estarão dentro dos limites dados pelos desvios.

As variabilidades para todos os parâmetros do circuito podem ser especificadas, para todos os elementos ou individualmente. O valor “default” é de 0.05 (ou 5% de tolerância). Alterar as variabilidades faz com que os desvios sejam recalculados (o cálculo é rápido). Esta facilidade permite que o efeito de cada parâmetro no comportamento do circuito seja estudado, e que a tolerância necessária para cada parâmetro seja facilmente determinada. Observe-se que o erro em dB causado por uma variabilidade isolada é função linear da variabilidade. Por exemplo, se com 5% de tolerância para todos os componentes o erro máximo de ganho em uma dada frequência for de 5 dB, se as tolerâncias forem reduzidas para 1%, o erro cairá para 1 dB. Inicialmente, as variabilidades das fontes independentes são nulas, já que usualmente não são consideradas em análises de sensibilidade. Se necessário, podem ser alteradas individualmente. A mudança global de variabilidades não as afeta.

## 7 - Sensibilidades com desconto

A opção de descontar as sensibilidades do valor em certa frequência pode ser usada para eliminar a parte invariante com a frequência das sensibilidades, apresentando apenas os erros que distorcem a forma das curvas da resposta em frequência. Em um filtro derivado de uma realização passiva LC duplamente terminada com máxima transferência de potência, esta frequência é onde o ganho é máximo (se o máximo ocorrer em CC, usa-se uma frequência baixa, não nula). Para filtros de outros tipos pode não ser rigorosamente correto usar esta opção, pois as sensibilidades podem não possuir uma parte invariante com a frequência, ou o valor constante pode não acontecer para todos os parâmetros na mesma frequência. Com o uso da opção, a parte real das sensibilidades listadas é apresentada com o desconto feito. Uma vez feito um desconto, ele permanece ativo até que a opção seja desligada ou que o nó de saída seja mudado. Note-se

que os erros calculados desta forma só são válidos em circuitos em que o valor absoluto do ganho não seja importante.

## 8 - Sensibilidades normalizadas pela inclinação

A opção de normalizar as sensibilidades pela inclinação é útil para eliminar as falsas altas sensibilidades que parecem ocorrer sempre que módulo ou fase variam rapidamente, como nas vizinhanças de zeros de transmissão. Os novos desvios podem ser interpretados como a distância perpendicular entre as curvas ideais e as reais de módulo e fase, se os diagramas forem plotados em módulo em  $\text{dB} \times 20\log(\omega)$  (“frequência em dB”), e fase em  $\text{graus} \times (180/\pi)\ln(\omega)$  (“frequência em graus”). Não é uma forma usual de se fazer análise de sensibilidades.

## 9 - Sensibilidades dos polos e zeros

Para análises de sensibilidade de polos e zeros, é necessário um arquivo de texto contendo os polos ou os zeros, no formato gerado pelo programa IFFT:

1a. linha: número de frequências.

Linhas seguintes: <real> <imag.> de cada polo ou zero.

As sensibilidades calculadas para polos e zeros “s” são não normalizadas:  $S_x^s = x \frac{\partial s}{\partial x}$ .

Os desvios estatísticos das partes real e imaginária calculados definem um retângulo onde o polo ou zero dever estar, centrado na posição ideal.

Como um refinamento desta medida, são ainda calculados a direção angular onde a variação maior é esperada e os raios maior e menor de uma elipse dentro da qual o polo ou zero dever estar. Os retângulos e elipses podem ser plotados juntamente com os polos ou zeros em um gráfico.

Neste gráfico, as setas do cursor movimentam os limites, + e - mudam a ampliação e Q, 5, < e > mudam a frequência selecionada. Espaço centra a frequência selecionada.

O cálculo de sensibilidade dos polos só funciona corretamente se a impedância de entrada da rede, como vista por um corte no ramo onde estiver o elemento usado como observador, que deve ser dos tipos R, L, C ou Z, possuir como zeros os polos desejados, sendo nula a impedância vista no corte nestas frequências. Ou seja, as sensibilidades dos polos da rede em relação ao parâmetro observador usado não podem ser nulas. O programa verifica isto e não calcula as sensibilidades de polos não claramente observáveis pelo elemento. Note-se que em alguns circuitos não existe um elemento que observe todos os polos. Neste caso, podem ocorrer problemas numéricos, pois a impedância vista por um corte no ramo observador possui zeros sobre os polos não observáveis, e o sistema de equações usado pelo programa torna-se singular. Uma redução na tolerância para admitâncias pode fazer com que o programa faça o cálculo, aproximadamente, assim mesmo, não parando por “determinante muito pequeno”.

No cálculo de sensibilidade dos zeros é também feita a verificação de se os zeros estão corretos. Sensibilidades de zeros que coincidam com polos não são calculáveis.

O parâmetro de tolerância para impedâncias e tensões pode ser aumentado para permitir cálculos aproximados quando os polos são pouco observáveis ou não muito precisos ou os zeros não são muito precisos. O outro parâmetro de tolerância, para admitâncias e frequências, é usado para detecção de sistemas de equações nodais singulares (determinante muito pequeno) e para impedir cálculo de sensibilidade de zeros na origem.

O programa IFFT deve ser usado para a obtenção precisa dos polos e zeros. Os cálculos devem ser feitos com a opção de apresentar resultados desnormalizados em frequência.

Os desvios estatísticos dos polos e zeros para diversos circuitos diferentes podem ser comparados pelo programa CPSPZ, a partir das tabelas geradas pelo SENSI.

## 10 - Arquivos de saída

O programa pode criar arquivos contendo o que for calculado na resposta em frequência e nas sensibilidades de polos e zeros. Outros cálculos podem ser salvos copiando-se o que é listado para um editor de texto.

## 11 - Observações

Amplificadores operacionais ideais devem ser usados sempre que possível, pois isto acelera o processo de solução do circuito e reduz o erro numérico.

Podem ocorrer problemas numéricos se os níveis de impedância do circuito forem muito elevados ou muito baixos. É recomendado que todas as análises sejam feitas em circuitos normalizados em frequência e impedância.

Nenhuma admitância ou transadmitância pode ser infinita, implicando que resistências e indutâncias não podem ser nulas, e que circuitos contendo indutores ou amplificadores operacionais reais não podem ser analisadas em frequência zero.

Em transformadores, o coeficiente de acoplamento não pode ser unitário. As sensibilidades são calculadas em relação às indutâncias recíprocas, mas com as indutâncias  $1/\Gamma_{11}$  e  $1/\Gamma_{22}$  tratadas como indutores.

Em escala logarítmica não é permitida a análise em frequência menor ou igual a zero. As escalas verticais e horizontais não podem ser invertidas se a grade estiver sendo usada.

Quando a resolução usada nos gráficos não é grande, detalhes importantes podem ser perdidos. Um caso crítico é o de máximos dos desvios de módulo normalizados pela inclinação, que em alguns filtros forma picos agudos. O valor correto dos picos pode ser obtido aumentando-se o número de segmentos, expandindo-se a escala horizontal, ou tomando-se o valor do desvio não normalizado na frequência do pico, que coincide com o normalizado, já que aí a curva de módulo é horizontal.

O programa foi portado para Windows a partir da antiga versão DOS. Tem a mesma funcionalidade, com alguns acréscimos, e com muito maior capacidade de memória.

Os programas auxiliares IFFT, CPSENSI e CPSPZ já tem versões para Windows disponíveis.

O programa SENSI pode ser distribuído livremente para propósitos educacionais e acadêmicos, desde que não seja alterado, e que referência a seu uso seja feita em trabalhos realizados com sua ajuda.

Comentários ou dúvidas sobre a utilização do programa podem ser remetidos para:

Dr. Antônio Carlos Moreirão de Queiroz  
Programa de Engenharia Elétrica, COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
CP 68504  
21941-972 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Ou, via e-mail, para: [acmq@ufrj.br](mailto:acmq@ufrj.br)

## 12 - Atualizações:

21/08/2008 – Versão 1.0.

21/11/2008 – Versão 1.0a - Aceita amp. op. de 4 terminais, ideal ou não.

16/12/2008 – Versão 1.0b - Gráfico logo após seleção de nó.

23/06/2011 – Versão 1.0c - Zoom e cursor com mouse. Cursor maior, transcondutância de modo comum na VCCS. Correções na documentação.

27/06/2011 – Versão 1.0d – Transformador com duas bobinas incluído. Melhorias nos cursores.

21/09/2011 – Versão 1.0e – Não muda diretório, 100 equações, trata erro de leitura.

11/07/2012 – Versão 1.0f – Zoom com mouse na janela de polos e zeros. Nomes diferentes para arquivos de polos e zeros, pequenos ajustes nas janelas.

31/07/2012 – Versão 1.0g – Recusa análise de sensibilidades com saída nula, o que causava erro. Melhor cursor.

11/04/2013 – Versão 1.0h – “+” e “-” do teclado normal funcionam no gráfico.

12/04/2013 – Versão 1.1 – Implementadas capacitâncias nos transistores.

09/08/2014 – Versão 1.1a – Cursor de polos e zeros corrigido, redesenho da janela de resposta em frequência corrigido.

08/12/2018 – Versão 1.1b – Listadas tensões da rede normal e da rede adjunta na janela de sensibilidades.

Última atualização: 8/12/2018