

Analizador Paramétrico de Transístores com Controlo de Temperatura

F. Campos⁽¹⁾, J. Coelho⁽¹⁾, M. Gomes⁽¹⁾⁽²⁾, A. Pinto⁽¹⁾⁽²⁾, H. Ramos⁽¹⁾⁽²⁾

¹ Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,
Departamento de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores
Rua Conselheiro Emídio Navarro, N. 1, 1950-062 Lisboa
isel@isel.ipl.pt Tel.218317000

² Centro de Estudos e Desenvolvimento de Electrónica e Telecomunicações
Rua Conselheiro Emídio Navarro, N. 1, 1950-062 Lisboa
contact@cedet.isel.ipl.pt Tel.218317284

Neste documento é descrito um analisador de características estáticas de transístores de junção bipolar cuja temperatura da cápsula do transístor em teste pode ser controlada, constituindo assim um dos parâmetros de análise.

O analisador foi desenvolvido para suprir a necessidade de demonstração em aulas laboratoriais da dependência com a temperatura de algumas características estáticas dos transístores bipolares, tendo portanto um cariz eminentemente pedagógico.

Introdução

A realização do projecto que se descreve decorreu no âmbito da disciplina de Projecto Final de Curso da licenciatura em Engenharia de Sistemas das Telecomunicações e Electrónica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, em 2004.

O objectivo deste trabalho foi a elaboração de um analisador de transístores de junção bipolar, (de tipo NPN ou PNP), com características didácticas. Pretende-se com este dispositivo medir a corrente de colectador (I_C) do transístor em função da tensão colectador-emissor (V_{CE}), usando como parâmetro ajustável não só a corrente de base (I_B), como é comum, mas também a temperatura da cápsula do transístor.

Para extracção das características estáticas do TJB em teste será necessária a implementação de um sistema gerador de sinais que possa gerar tensões entre colectador e emissor e correntes de base programáveis. Para concepção do gerador de sinais e extracção de características do transístor foram objectivos deste trabalho os seguintes valores de parâmetros de ensaio: corrente de base máxima $\pm 1\text{mA}$, corrente de colectador máxima $\pm 300\text{mA}$, tensão colectador-emissor máxima $\pm 9\text{V}$, temperatura mínima $+5^\circ\text{C}$, temperatura máxima $+60^\circ\text{C}$, potência de dissipação do transístor $0,5\text{W}$, caixa do transístor TO92.

Para que a temperatura do transístor em teste seja um parâmetro ajustável foram desenvolvidos circuitos que realizam um controlador PID obtendo-se, com a utilização de uma célula termoeléctrica de Peltier (modelo MI1025T [1]) acoplada à cápsula do transístor, a estabilização da temperatura pretendida para o ensaio na gama de 5°C a 60°C . A utilização da célula de Peltier e respectivo controlador permitem a realização de ensaios a temperaturas superiores ou inferiores à temperatura ambiente.

Circuitos para Extração das Características Estáticas dos Transístores

Neste conjunto de circuitos estão englobados o circuito de medição da corrente de colectores e detecção da sua polaridade, os circuitos de geração da corrente de base e da tensão colectores-emissor do transistor em teste e o conjunto de dispositivos de interface para geração das tensões programadas no microcontrolador (DAC e Adaptador bipolar).

Medição da corrente de colectores e detecção de polaridade

Para medição da corrente de colectores é utilizado um conversor corrente-tensão baseado no circuito integrado MAX472. Este conversor tem as entradas flutuantes e permite medir corrente em ambos os sentidos sem perda da informação do respectivo sinal algébrico. Para compatibilizar a gama de tensões de saída deste conversor com a gama de tensões de entrada do conversor analógico-digital do microcontrolador foi utilizado um circuito deslocador de nível, obtendo-se assim variações de tensão entre 0 e 5V.

Geração da corrente de base e da tensão colectores-emissor do transistor em teste

A geração da corrente de base é efectuada por um amplificador de transconductância de carga à massa (topologia de *Howland*). Este circuito constitui uma fonte de corrente programável, controlada pelo microcontrolador ao qual está ligado através de um DAC.

A tensão V_{CE} do transistor em teste é gerada por um amplificador de tensão baseado no circuito integrado TDA2030.

Dispositivo de interface com o microcontrolador

Para interligação do microcontrolador aos geradores de I_B e de V_{CE} foram utilizados conversores DAC com saída bipolar (representação de valores positivos e negativos de tensão), concretamente o modelo TLC7628C de 8 bits.

Controlo da Temperatura de Ensaio

Englobados neste conjunto de circuitos electrónicos encontram-se os circuitos de controlo da temperatura e de actuação da célula de Peltier. Foram ainda realizados circuitos de protecção daquela célula. No sentido de permitir a medição das temperaturas envolvidas (temperaturas de ambas as faces da célula de Peltier e temperatura ambiente) foram utilizados diversos sensores e construídos os respectivos circuitos acondicionadores de sinal. A necessidade de medição da temperatura de ambas as faces da célula decorre de ser a diferença entre estas temperaturas a variável controlada pelo sistema de controlo projectado.

Célula de Peltier, sensores e acondicionadores de sinal associados.

A célula de Peltier (figura 2) é actuada em tensão de modo a gerar um diferencial de temperatura entre as suas duas faces. Mantém-se a temperatura de uma das faces da célula aproximadamente constante recorrendo a um dissipador com ventilador, enquanto à outra face está acoplada a cápsula do transistor em teste. O circuito acondicionador de sinal de ataque à célula é realizado com um amplificador de tensão (e de potência), baseado num circuito integrado TDA2030.

A medição da temperatura das duas faces da célula e da temperatura ambiente é realizada com três sensores do tipo LM35. Estes sensores têm uma saída em tensão com sensibilidade de 10mV/°C. Os circuitos de acondicionamento de sinal destes sensores (interfaces de ligação ao microcontrolador) são realizados através de amplificadores operacionais em montagem não inversora. A medição do diferencial de temperatura entre as duas faces da célula, (sinal de realimentação do sistema de controlo realizado), é efectuada por um circuito subtrator.

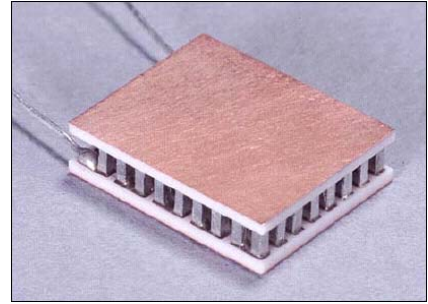


Figura 2. Célula de Peltier utilizada no protótipo.

Circuitos de protecção da célula de Peltier.

Foram usados dois circuitos de protecção, independentes. Um deles foi realizado por um circuito comparador regenerativo que inibe a actuação da célula quando a sua temperatura se aproxima do valor máximo especificado pelo fabricante (85°C). O segundo circuito de protecção, consistindo num *array* de díodos e num fusível em série, impede a ocorrência de valores de tensão aplicados à célula superiores a $\pm 3V$, bem como valores de corrente superiores a 1,8A.

Sistema de controlo de temperatura da célula de Peltier.

O sistema escolhido para controlo da temperatura da célula de Peltier implementa um controlador linear de tipo PID (Proporcional Integral Derivativo) [3], inserido na malha de acção do sistema a controlar. O objectivo principal a atingir com este controlador é o de anular o erro em regime permanente do sistema controlado na resposta a uma entrada do tipo escalão, (valor constante da temperatura a que a célula deve ser colocada para a execução do ensaio pretendido, durante o intervalo de tempo de duração desse ensaio). Como segunda especificação no critério de escolha do controlador está o de reduzir o tempo de estabelecimento na obtenção dessa resposta, permitindo a melhoria da rapidez de resposta do sistema. Para o tipo de sistema a controlar, (célula de Peltier com dissipador acoplado), o controlador escolhido permite ainda a melhoria do desempenho em termos de diminuição da sobre-elevação na resposta ao tipo de entrada referida e um acréscimo na robustez do sistema [4].

Na figura 3 representa-se o diagrama de blocos do sistema controlado, evidenciando-se o bloco controlador.

A função de transferência que implementa um controlador linear PID é do tipo $C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$.

O dimensionamento dos parâmetros proporcional, integral e derivativo foi efectuado a partir do Método da Curva de reacção de *Ziegler-Nichols* [4]. As regras deste método baseiam-se na obtenção prévia, em ensaio experimental, da resposta do sistema em malha aberta. Na figura 4 apresenta-se o ensaio experimental do sistema em estudo evidenciando-se as grandezas a extrair para utilização no dimensionamento.

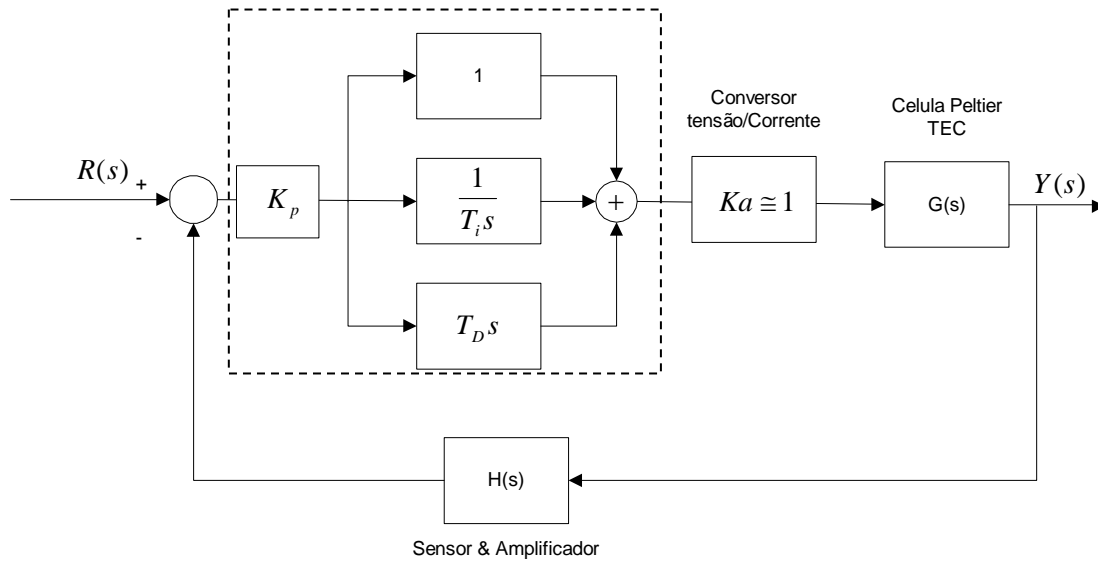


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema controlado. Controlador $C(s)$ em destaque.

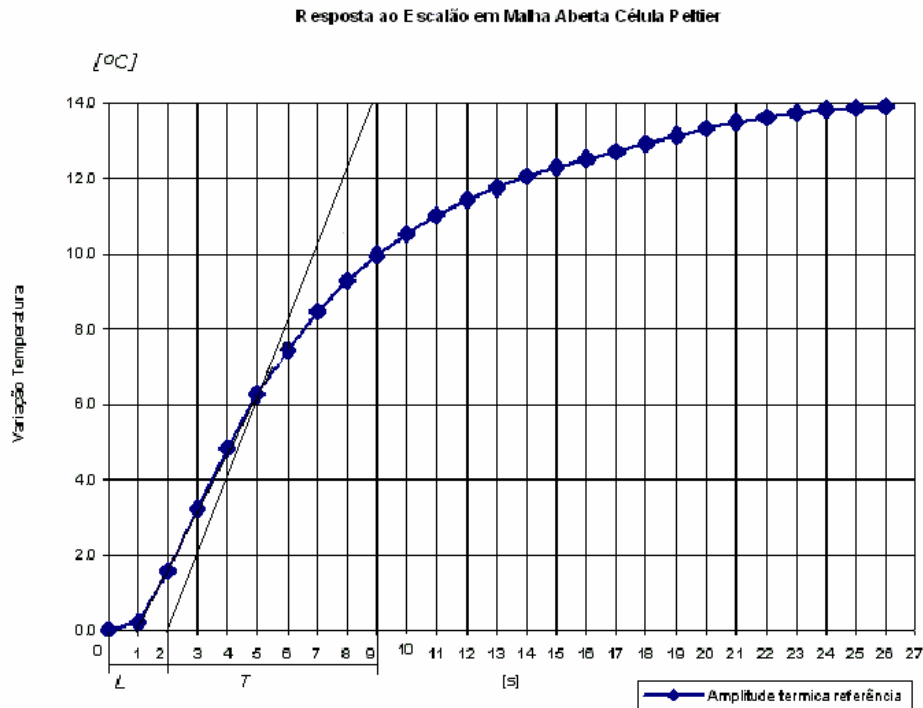


Figura 4. Ensaio experimental em malha aberta do sistema em estudo

Usando os valores aconselhados pelo método de *Ziegler-Nichols* e a curva experimental que serviu de referência ao modelo do sistema em malha aberta, obtiveram-se os seguintes parâmetros do controlador: $K_p = 4,2$; $T_I = 4$ e $T_D = 1$ [5]. O circuito electrónico real utilizado para a concepção deste controlador está representado na figura 5, tendo sido dimensionado de forma a implementar a função de transferência $C(s)$ referida [5].

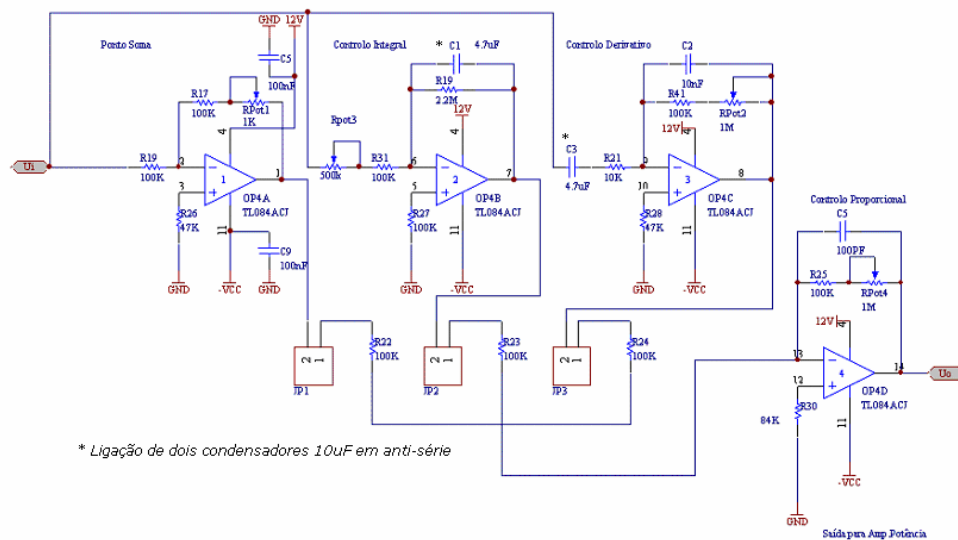


Figura 5. Circuito electrónico real para realização do controlador PID.

Resultados Experimentais

Testes ao sistema de controlo projectado.

Apresenta-se no gráfico da figura 6 a resposta do sistema de controlo projectado a uma entrada de referência do tipo escalão. Estes resultados experimentais foram obtidos para uma temperatura de teste de 6°C, apresentando-se o gráfico referido normalizado para esta temperatura.

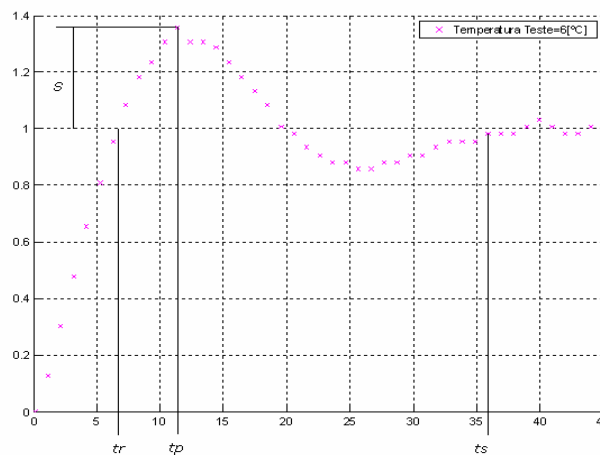


Figura 6. Resposta do sistema controlado a uma entrada escalão.

Testes experimentais ao sistema completo.

De acordo com o projecto elaborado é possível variar três parâmetros usados no ensaio ao transistor: a corrente de base I_B , a tensão de colector-emissor V_{CE} e a temperatura de teste. Nas figuras 7 a 10 apresentam-se resultados experimentais obtidos com o protótipo construído, para um transistor PNP do tipo BC327. Nas duas primeiras figuras os resultados foram obtidos para uma temperatura de teste constante de 40°C. No teste a que se refere a figura 7 representa-se a variação da corrente I_C com a tensão V_{CE} , para três valores distintos da corrente I_B . Na figura 8 é mantida constante a tensão V_{CE} , obtendo-se a variação de I_C com a corrente I_B . Na figura 9 está representada a dependência do parâmetro h_{FE} do transistor com a temperatura. A exemplificação da constância da temperatura durante um ensaio encontra-se ilustrada na figura 10.

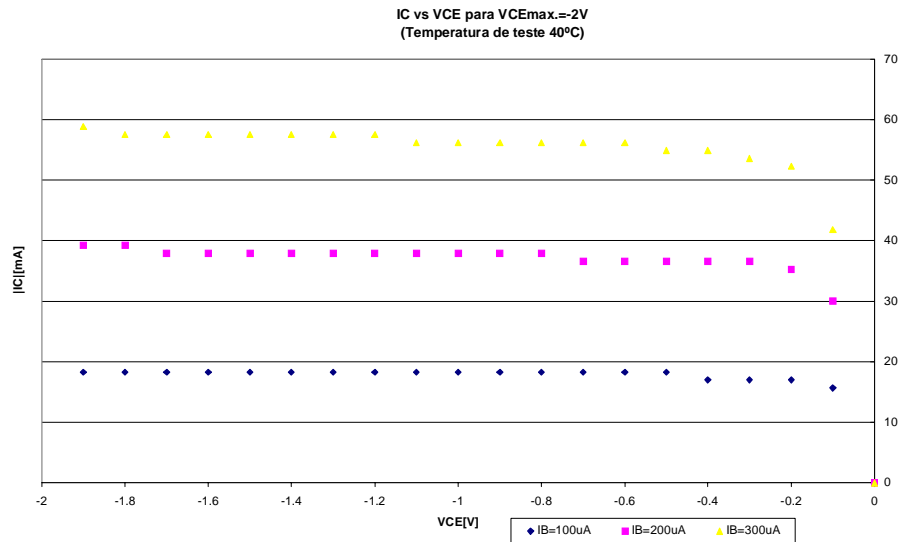


Figura 7. Corrente I_C em função da tensão V_{CE} .

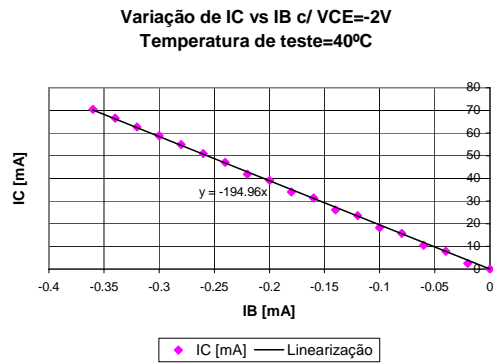


Figura 8. I_C em função de I_B .

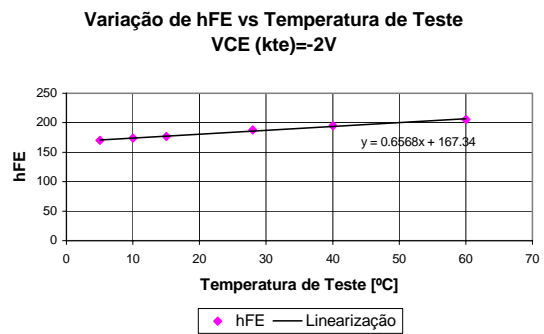


Figura 9. Dependência de h_{FE} com a temperatura.

Temperatura Célula vs Tempo de Amostragem

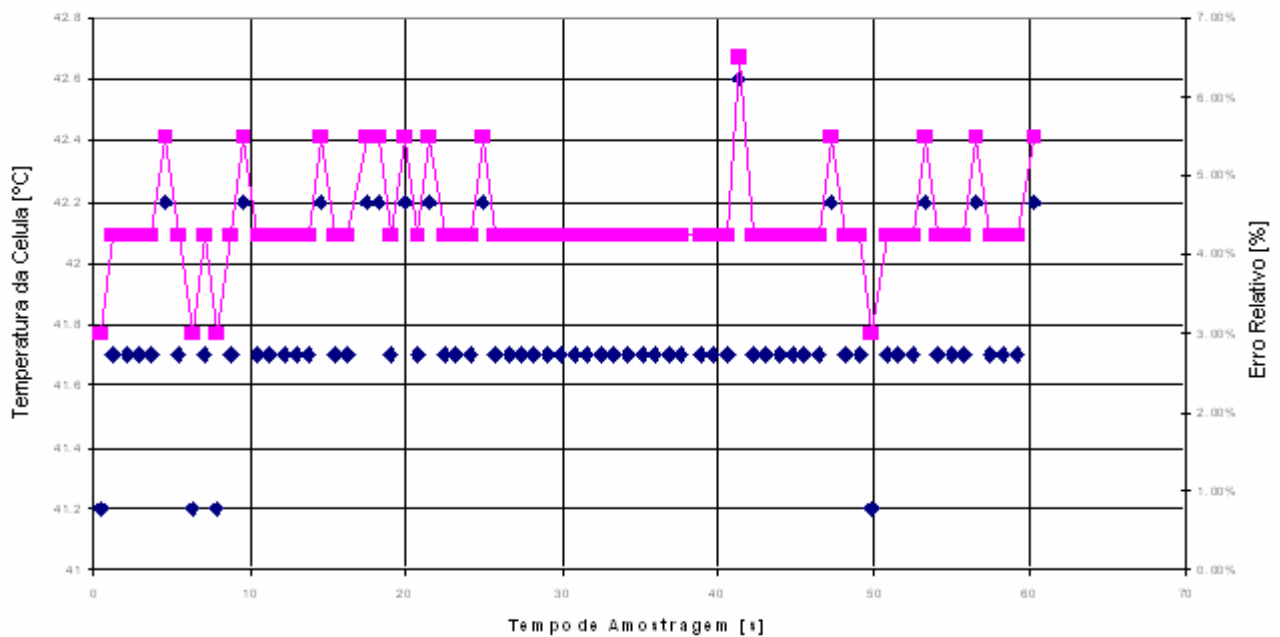


Figura 10. Exemplificação da constância da temperatura durante um ensaio.

Conclusões

Neste projecto foi realizado o protótipo de um Analisador Paramétrico de Transístores de Junção Bipolar com Controlo de Temperatura que cumpriu os objectivos enunciados na introdução deste documento.

A tabela seguinte resume as características técnicas deste sistema.

V_{CE}	Resolução V_{CE}	$I_{Bmin.}$	$I_{Bmax.}$	Resolução I_B	I_{Cmin}	$I_{Cmax.}$	Resolução I_C	$P_{Dmax.}$
[V]	[mV]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[W]
± 10	$\pm 78,74$	$\pm 0,01$	± 1	$\pm 0,0078$	$\pm 1,373$	± 350	$\pm 1,373$	1,5

Tabela 1. Resumo das características técnicas

Como limitações mais relevantes há a destacar: as resoluções da corrente de base imposta pelo *hardware* ($7,8\mu A$), da tensão colector-emissor (78mV) e da temperatura, que poderão ser melhoradas, por exemplo utilizando DAC's de mais de 8 bits. Para aumentar a precisão na medição da corrente de colector poderá ser utilizado um conversor Analógico/Digital com mais de 8 bits.

O sistema de controlo de temperatura projectado evidenciou igualmente a existência de um erro relativo no erro estático de posição inferior a 6% e um tempo de estabelecimento na resposta ao escalão da ordem de grandeza dos 36s.

Bibliografia

[1] Marlow[consult. 01 Out. 2003]

http://www.marlow.com/TechnicalInfo/themoelectric_cooler_selection_p.htm

http://www.marlow.com/TechnicalInfo/tec_mounting_method_procedures.htm

[2] LightWave[consult. Jan.2004]

http://www.lightwave.com/sect_support/library/NICs/Documents/SCPL.pdf

[3] WAVELENGTH Electronics- *Technical Note TN-TC01 Rev B*, 1995

[4] Ogata, K., *Engenharia de Controle Moderno*, 2ª edição, Prentice Hall Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 1993

[5] Campos, F. e Coelho, J., *Testador Paramétrico de Transístores*, Relatório de Projecto Final de Curso da licenciatura em Engenharia de Sistemas das Telecomunicações e Electrónica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Out. 2004.