

# Analizador Paramétrico de Transístores com Controlo de Temperatura

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

<sup>1</sup> 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  
[isiel@isiel.ipl.pt](mailto:isiel@isiel.ipl.pt) Tel.218317000

<sup>2</sup> Centro de Estudos e Desenvolvimento de Electrónica e Telecomunicações  
Rua Conselheiro Emídio Navarro, N. 1, 1950-062 Lisboa  
[contact@cedet.isel.ipl.pt](mailto: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 colector ( $I_C$ ) do transístor em função da tensão colector-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 colector 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 colector máxima  $\pm 300\text{mA}$ , tensão colector-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.

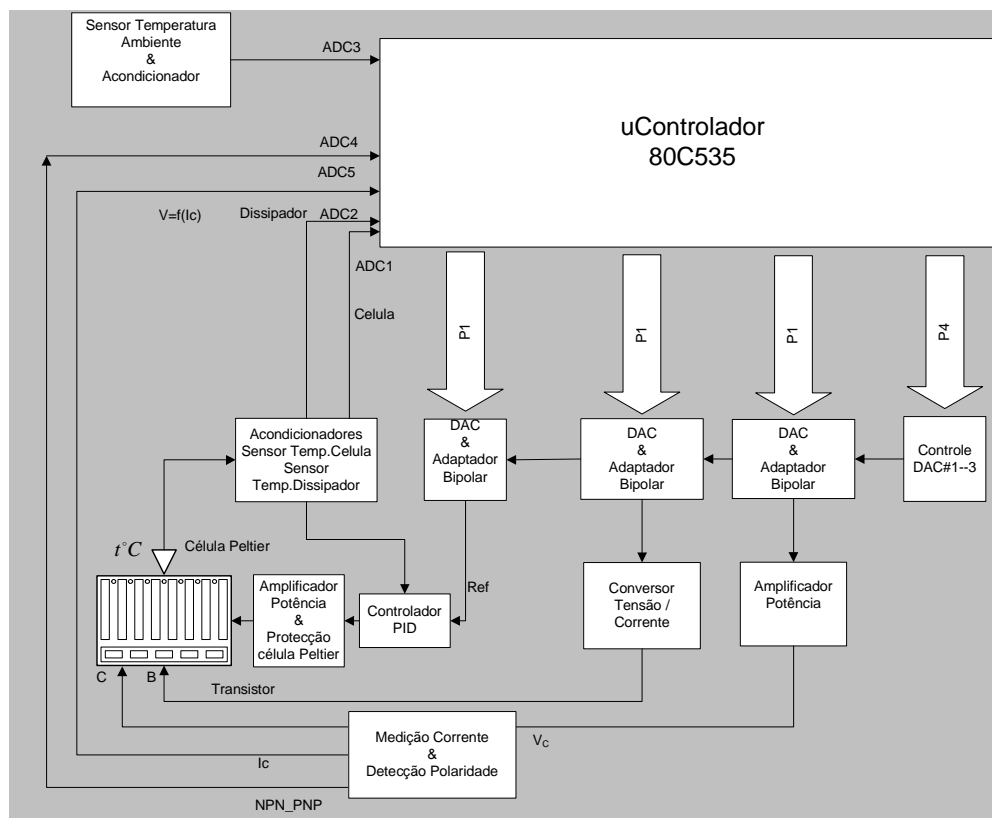
Para que a temperatura do transístor em teste seja um parâmetro ajustável foram desenvolvidos circuitos que realizam um controlador PID obtendo-se, com a utilização de uma célula termoeléctrica de Peltier (modelo MI1025T [1]) acoplada à cápsula do transístor, a estabilização da temperatura pretendida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

O analisador é composto por um microcontrolador e diversos circuitos analógicos, nomeadamente por circuitos de geração dos sinais de teste, circuitos de medição de corrente e tensão, bem como por circuitos de controlo e de acondicionamento de sinal dos elementos sensores de temperatura e da célula termoelétrica.

Foi ainda desenvolvido um programa para execução num computador pessoal, utilizado para configuração dos testes a realizar e respectiva visualização de resultados. Para permitir a aplicação didáctica deste analisador, o programa desenvolvido para execução no computador pessoal (“lado do utilizador”) foi realizado em MATLAB e deixado “aberto”, com fontes disponíveis, sendo estruturado de forma a facilitar a sua reutilização por alunos ou professores. A comunicação entre o analisador e o computador pessoal usa comandos de acordo com o *SCPI Consortium*, versão 1999, comum a inúmeros aparelhos de teste e medida comerciais [2].

## Descrição Esquemática do Sistema Realizado

Na figura 1 encontra-se representado o diagrama de blocos do dispositivo realizado. No esquema referido não se encontram representados os circuitos de alimentação utilizados nem os fluxogramas da programação do dispositivo.



**Figura 1. Diagrama de Blocos detalhado**

O sistema desenvolvido é constituído por três conjuntos de circuitos electrónicos: um agrupando os circuitos que executam a extracção das características estáticas do TJB, outro formado pelos circuitos que realizam o controlo da temperatura do ensaio e finalmente um terceiro que realiza a alimentação do sistema projectado. O sistema inclui ainda módulos de programação, nomeadamente um módulo com a implementação do protocolo *SCPI* para comunicação entre a aplicação e o microcontrolador, e outro com o programa de interface com o utilizador (realizado em MATLAB).

## **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 transcondutância 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.

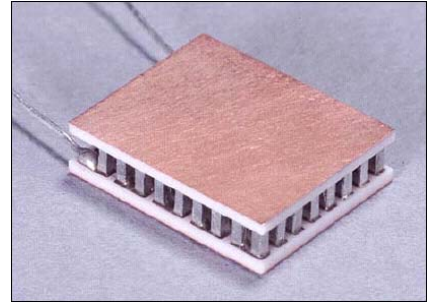
## **Controlo da Temperatura de Ensaio**

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 condicionadores 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 condicionadores 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 condicionador 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.

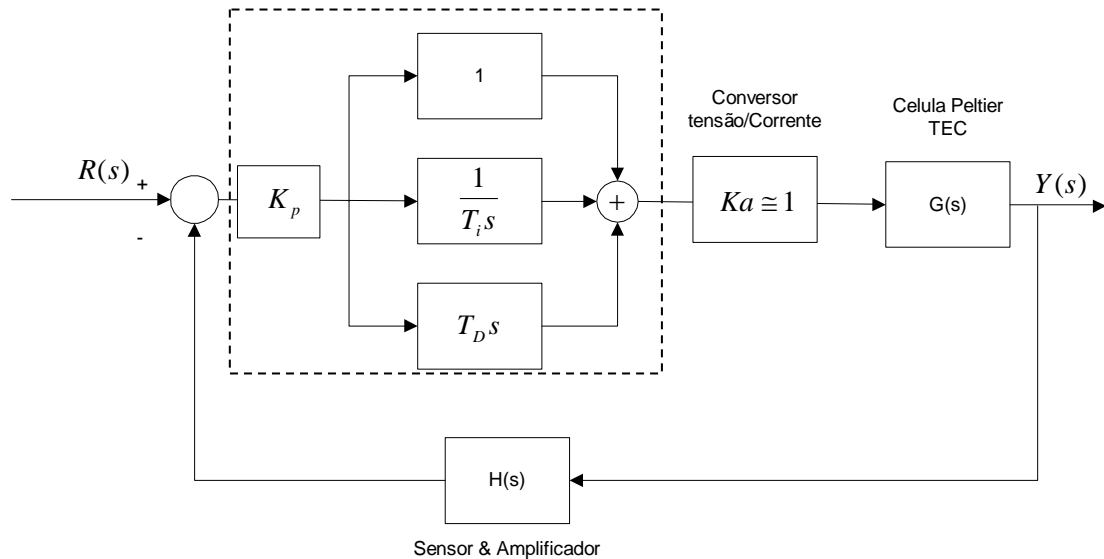


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema controlado. Controlador  $C(s)$  em destaque.

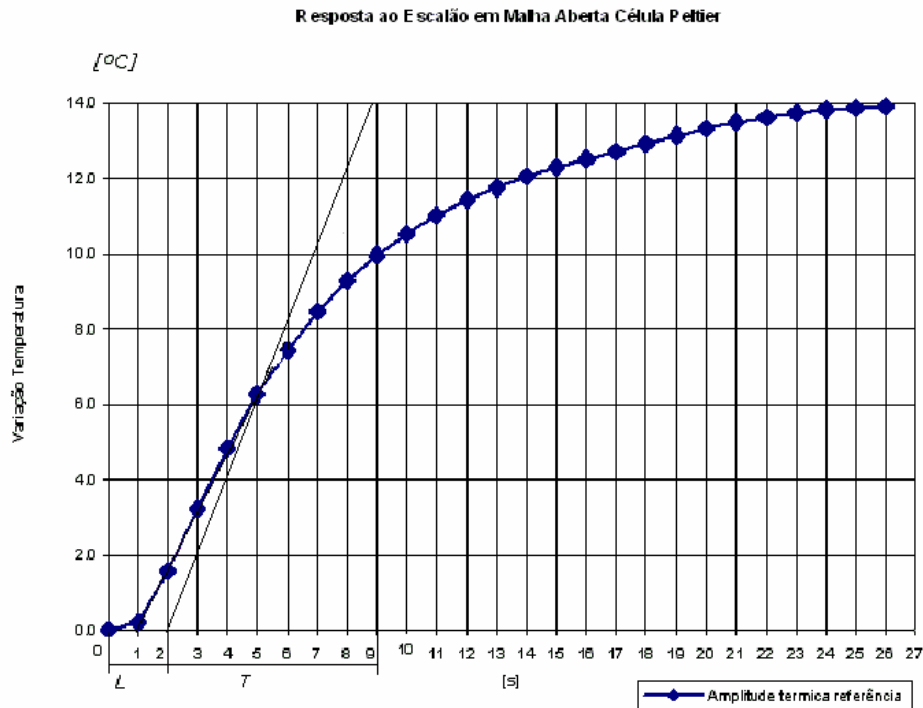


Figura 4. Ensaio experimental em malha aberta do sistema em estudo

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].

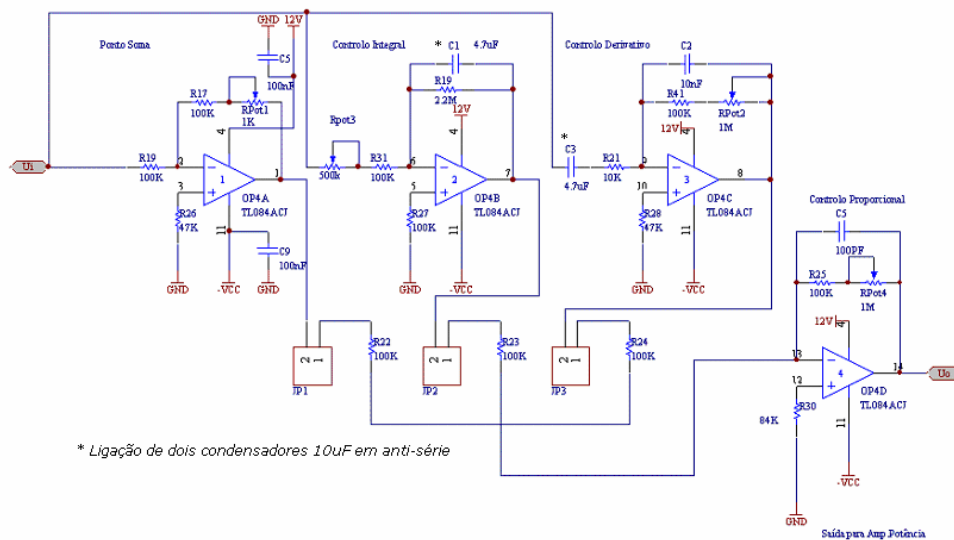


Figura 5. Circuito electrónico real para realização do controlador PID.

## 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.

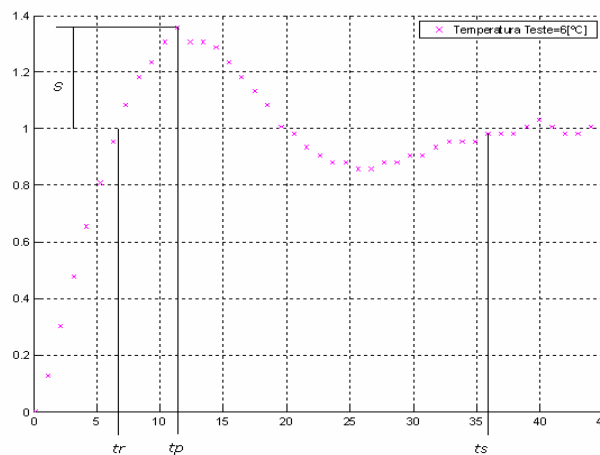


Figura 6. Resposta do sistema controlado a uma entrada escalão.

### 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.

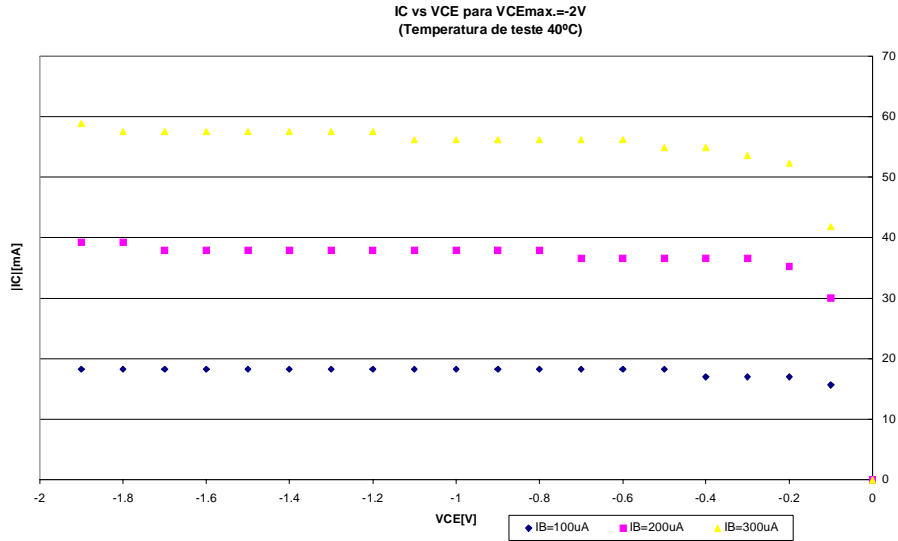


Figura 7. Corrente  $I_C$  em função da tensão  $V_{CE}$ .

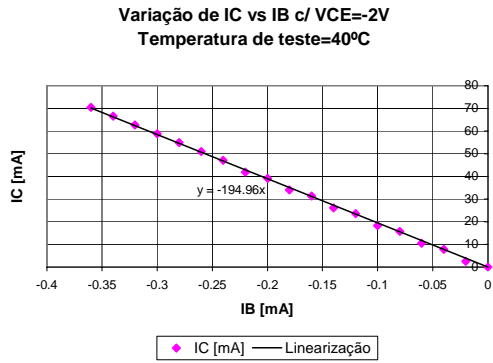


Figura 8.  $I_C$  em função de  $I_B$ .

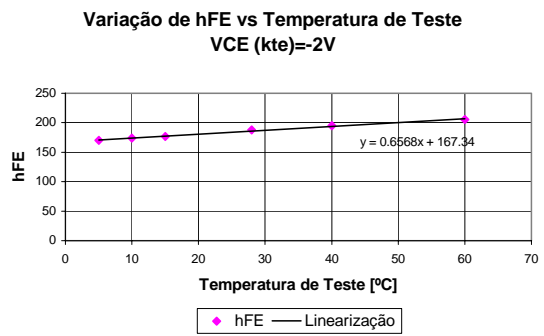


Figura 9. Dependência de  $h_{FE}$  com a temperatura.

Temperatura Célula vs Tempo de Amostragem

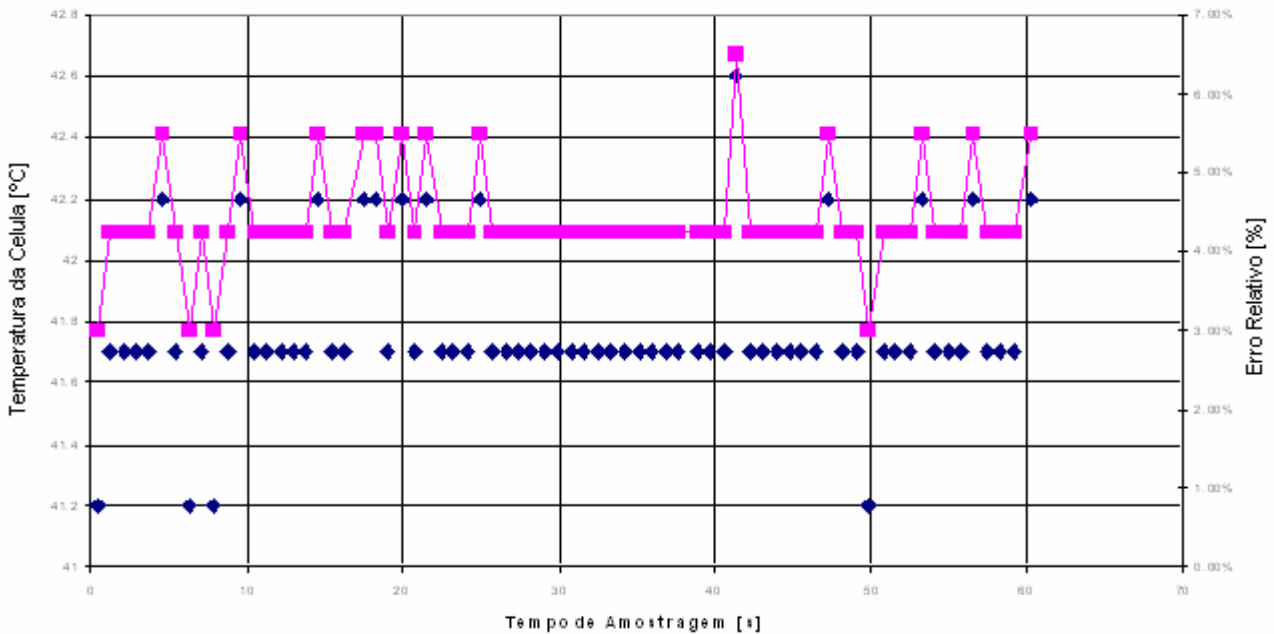


Figura 10. Exemplificação da constância da temperatura durante um ensaio.

## 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]
$\pm 10$	$\pm 78,74$	$\pm 0,01$	$\pm 1$	$\pm 0,0078$	$\pm 1,373$	$\pm 350$	$\pm 1,373$	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/themoelectric_cooler_selection_p.htm)

[http://www.marlow.com/TechnicalInfo/tec\\_mounting\\_method\\_procedures.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/SCPI.pdf](http://www.lightwave.com/sect_support/library/NICs/Documents/SCPI.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.