

# Registador de dados para aplicações de baixo consumo

J. Casaleiro<sup>(1) (2)</sup>, J. Rocha<sup>(1) (2)</sup>, R. Reis<sup>(1) (2)</sup>, A. Pinto<sup>(1) (2)</sup>, T. Oliveira<sup>(1) (2)</sup>, M. Gomes<sup>(1) (2)</sup>, P. Fazenda<sup>(1) (2)</sup>, V. Costa<sup>(1) (2)</sup>, C. Carvalho<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  
[joao.casaleiro@cedet.isel.ipl.pt](mailto:joao.casaleiro@cedet.isel.ipl.pt) Tel. 218317238

<sup>2</sup> Centro de Estudos e Desenvolvimento de Electrónica e Telecomunicações  
Rua Conselheiro Emídio Navarro, N. 1, 1950-062 Lisboa  
[cedet@cedet.isel.ipl.pt](mailto:cedet@cedet.isel.ipl.pt) Tel. 218317284

*Este artigo descreve uma arquitectura de um registador de dados para aplicações de baixo consumo. São apresentados resultados experimentais sobre o desempenho do oscilador, que é um dos módulos do registador. São ainda apresentadas estimativas do consumo do registador e dos respectivos módulos. A autonomia e a estabilidade são os critérios de projecto mais relevantes de um registador de dados para aplicações de baixo consumo que exijam precisão temporal, por exemplo a sismologia oceânica.*

## Introdução

Actualmente as ondas sísmicas podem ser geradas de forma natural ou artificial. Pode obter-se informação sobre a velocidade de propagação das ondas sísmicas e geometria das estruturas da Terra com base no conhecimento dos movimentos da crosta terrestre, desde que os eventos sejam registados com informação da hora e localização das estações registadoras. A análise sísmológica, realizada no mar a grandes profundidades (da ordem dos 3000 metros), é uma das vertentes da pesquisa oceanográfica que possibilita, nomeadamente, o estudo do movimento das placas tectónicas (onda sísmica natural) ou a prospecção de jazigos de petróleo (onda sísmica provocada).

Esta pesquisa envolve algumas particularidades resultantes das condições adversas impostas pelo meio em que o sistema irá funcionar. O registador terá de estar contido numa cápsula estanque (tipicamente uma esfera) que irá suportar pressões externas elevadas (tipicamente acima de 300 atmosferas). A imersão da cápsula aumenta a complexidade de transmissão de dados a débitos elevados para a superfície, o que requer do sistema capacidade de armazenamento de dados e autonomia adequadas. Frequentemente, enviam-se várias cápsulas, nem sempre em simultâneo, cobrindo uma área de estudo pré-definida, o que inviabiliza a comunicação entre registadores, provocando o problema adicional do sincronismo na aquisição de dados. Na impossibilidade de realizar este sincronismo após a imersão, é imperativa a existência de uma referência temporal de estabilidade adequada em cada cápsula. Esta referência permitirá a determinação precisa da correspondência temporal dos dados adquiridos pelas várias cápsulas, após a emersão. A base de tempo de cada cápsula é sincronizável via GPS.

A localização da cápsula aquando da sua recolha, constitui igualmente um problema, pois a trajectória ascendente desta última pode ser facilmente alterada por correntes marítimas. Para resolver este problema podem ser utilizadas duas soluções. Uma baseada num farol luminoso (apenas para recolha nocturna) e outra

baseada num rádio-farol com possibilidade de transmissão da localização da cápsula, obtida por um GPS incluído nesta.

## Arquitectura do registador

A arquitectura do registador tem o diagrama de blocos representado na Figura 1. Neste diagrama o geofone e o hidrofone são sensores externos ao registador, que se encontram no exterior da cápsula.

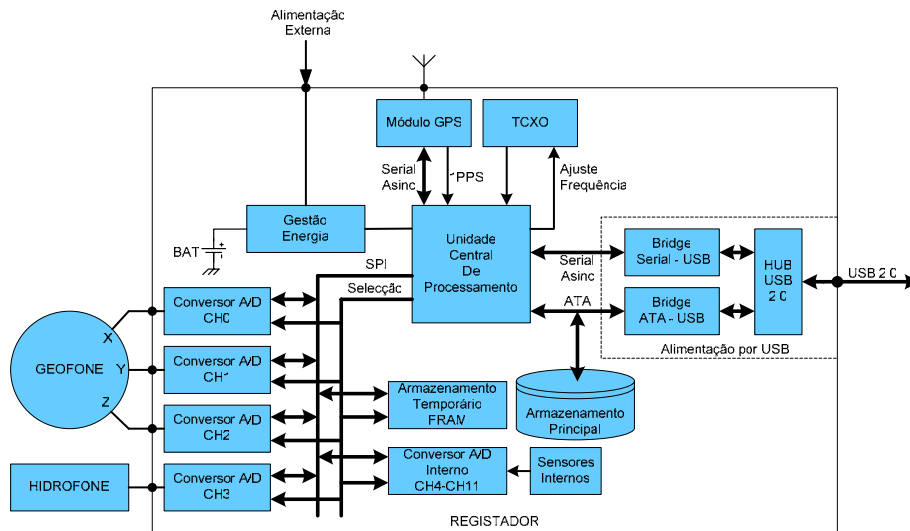


Figura 1 - Diagrama de blocos do registador de dados.

### Unidade Central de Processamento (CPU – *Central Processing Unit*)

O CPU é um microcontrolador de 16 bits pertencente à família MSP430 da Texas Instruments, com 5 MIPS (milhões de instruções por segundo) de capacidade de processamento e um consumo máximo de cerca de 2,65mA a 3,3V, com todos os periféricos necessários em funcionamento.

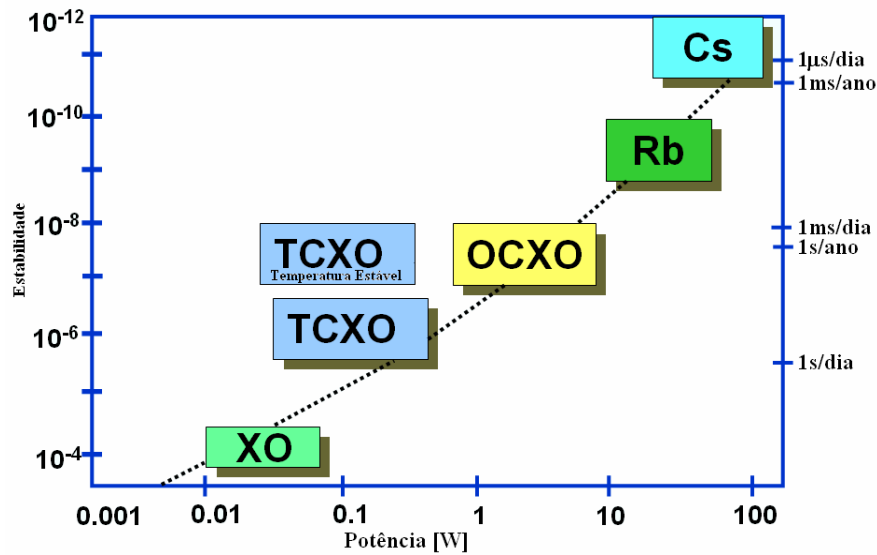
O microcontrolador executa todas as funções necessárias à aquisição e armazenamento dos sinais provenientes dos 4 canais (CH0-3) ligados aos sensores externos (geofone e hidrofone), bem como dos 8 canais (CH4-11) ligados a sensores internos. Tem ainda como função a interpretação dos dados recebidos pelo módulo GPS, necessários ao processo de sincronização e de localização.

### Base de Tempo (TCXO – *temperature compensated crystal oscillator*)

A base de tempo é constituída por um oscilador compensado em temperatura (TCXO) da Vectron International com 10MHz de frequência de oscilação e com uma estabilidade de  $\pm 3 \times 10^{-7}$ , no intervalo de temperatura entre 0°C a 50°C. A Figura 2 ilustra, para o actual estado da tecnologia, a relação entre estabilidade de um determinado tipo de oscilador e a potência consumida [1]. Verifica-se que os osciladores atómicos (Césio-Cs e Rubídio-Rb) são os de maior estabilidade, mas o seu consumo é mais elevado que os osciladores de cristal (XO, TCXO e OCXO). O oscilador do tipo TCXO constitui uma solução de compromisso entre estabilidade e consumo, adequada para a aplicação em causa. Os gráficos de estabilidade em função de tamanho ou preço são semelhantes ao da Figura 2.

A estabilidade do oscilador especificada pelo fabricante é garantida para uma variação de temperatura desde 0°C até 50°C. No entanto, verificou-se por testes efectuados, que a estabilidade do oscilador aumenta

com a diminuição da variação de temperatura, tendo atingido  $1,5 \times 10^{-8}$  para uma variação de temperatura entre  $-2^{\circ}\text{C}$  e  $+3^{\circ}\text{C}$ , como mostra a Figura 5. No fundo oceânico a temperatura é estável até a centésima de grau [2], sendo expectável que a estabilidade do oscilador atinja  $1,5 \times 10^{-9}$ .



**Figura 2 - Relação estabilidade - potência das várias tecnologias de osciladores [1]**

Para se poder correlacionar os dados provenientes de vários registadores, não pode existir sobreposição de dados adquiridos por eles. Garante-se a não sobreposição de dados se o desvio temporal entre registadores for inferior ao tempo entre amostras. Por exemplo, para que não haja sobreposição entre amostras com um ritmo de aquisição de 200 amostras por segundo, o desvio temporal máximo entre registadores deve ser inferior a  $1/200=0,005$  segundos. Se a base de tempo atingir uma estabilidade de  $1,5 \times 10^{-9}$  e admitindo o pior caso, ou seja, um registador com uma base de tempo sem desvio e outro com desvio constante de  $1,5 \times 10^{-9}$ , então a sobreposição dos dados adquiridos pelos registadores acontece ao fim de  $0,005/1,5 \times 10^{-9} = 3,3 \times 10^6$  segundos, o que é equivalente a 38 dias. Se o tempo de registo for superior a este valor é conveniente usar uma base de tempo com maior estabilidade.

### Módulo GPS (*Global Positioning System*)

No sincronismo temporal e na localização espacial do registador, é utilizado um módulo receptor GPS da empresa  $\mu$ blox, com uma antena activa.

O módulo GPS é activado antes da imersão da cápsula, para estabelecer o sincronismo do registador com a hora UTC (*Correlated Universal Time*) e fornecer um sinal de 1Hz de referência para ajuste do oscilador (TCXO). Após este sincronismo e calibração, o módulo GPS e a respectiva antena são desligados.

Após a emersão da cápsula, o módulo GPS é reactivado para obtenção da sua localização, que é transmitida periodicamente por rádio-frequência para o barco de recolha. Para que o cálculo da localização seja inferior a 45 segundos é necessária a retenção dos dados (do almanaque) na memória do módulo.

O consumo do módulo e da antena é aproximadamente 200mA. Se desactivados, o consumo baixa para  $20\mu\text{A}$ , o que é suficiente para reter os dados na memória do módulo.

## Sensores Internos

Os sensores internos à cápsula permitem monitorizar as seguintes grandezas: tensões nas baterias, pressão e temperatura dentro da cápsula.

O registador contém um conversor analógico-digital (ADS1218 da Texas Instruments) com oito canais que permitem a monitorização das grandezas referidas usando, no caso da pressão e da temperatura, os sensores SDX15A da SenSym e uma termistância do tipo NTC, respectivamente.

O consumo combinado do conversor e dos sensores é aproximadamente 2mA, segundo dados dos fabricantes.

## Módulo de Aquisição

O protótipo desenvolvido foi projectado para funcionar com quatro módulos de aquisição. A alimentação dos módulos é uma tensão não regulada superior a 5V fornecida por um conjunto de baterias. Cada módulo faz a regulação de tensão, adequada ao seu conversor analógico-digital.

A comunicação com os módulos usa a interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) a 3,3V. O protótipo suporta actualmente a comunicação com os conversores AD7714, ADS1210 e ADS1217.

A aquisição de dados é realizada através de quatro módulos baseados num dos conversores analógico-digital da tabela 1, todos com resolução de 24 bits e topologia sigma-delta. São estes quatro módulos que formam os quatro canais de aquisição dos sensores externos.

O ritmo de aquisição e a frequência do modulador dos conversores são configuráveis, permitindo ajustá-los mediante a aplicação, reduzindo o consumo médio.

	Alimentação (V)	Frequência Máx. do Modulador (Hz)	Ritmo Máx. de Aquisição (Hz)	Consumo (mW)
AD7714	+3,3 ou +5,0	39062,5	1000	7
ADS1210	+5,0	312500	16000	35,5
ADS1217	+3,3	19200	1000	3,3

**Tabela 1. Comparação entre os três conversores suportados pelo protótipo.**

## Baterias

O registador tem quatro conjuntos de baterias independentes para alimentar os seguintes subsistemas: electrónica digital (CPU, comunicação, TCXO), armazenamento de dados (*CompactFlash* ou disco rígido), módulos de aquisição, receptor GPS e respectiva antena.

## Armazenamento de Dados

Os dados são armazenados em memória não volátil do tipo *CompactFlash* ou em disco rígido. Para tal, o registador disponibiliza uma interface IDE (*Integrated Drive Electronics*) de 44 pinos.

Um aspecto importante é a quantidade de dados a armazenar, que depende directamente, do ritmo de aquisição dos sinais e da taxa de compressão dos dados, durante o tempo de funcionamento do registador. A título de exemplo, se o registador estiver a recolher dados de quatro canais a um ritmo de 200 amostras por segundo, durante um mês e sem compressão, será necessário armazenar cerca de 6GBytes.

O consumo da unidade de armazenamento depende bastante da tecnologia utilizada: para uma *CompactFlash* de 4GByte é aproximadamente 80mA a 3,3V e para um disco rígido cerca de 500mA, a 5V.

## **Modo de Operação**

O modo de operação é constituído por cinco estados de funcionamento. A passagem entre estados é executada de forma automática ou por ordem do operador.

### **Estado de Configuração**

Neste estado, configura-se o sistema mediante os dados recebidos através da interface USB a partir de um PC. A configuração consiste na definição do ritmo de aquisição de cada canal, na programação do módulo GPS e na preparação do dispositivo de armazenamento para a recepção de dados. Após a configuração do registador, o operador muda o sistema para o estado de sincronização.

### **Estado de Sincronização entre Registadores**

Neste estado o registador interpreta os dados do GPS e sincroniza-se quando o DOP (*Dilution of Precision*) for inferior a 1,7 unidades. Na sincronização, o registador efectua a calibração do TCXO com base na frequência do sinal 1PPS do GPS. Após isto, o registador acerta o seu relógio interno com a hora UTC. Depois da sincronização, o registador passa automaticamente para o estado de monitorização.

### **Estado de Monitorização**

Este estado é o último antes da imersão da cápsula e serve para o operador verificar se o sistema está a funcionar correctamente.

São enviados para o PC (através da interface USB) os valores de pressão e temperatura internas da cápsula, as tensões nas baterias e os sinais provenientes dos sensores externos.

A medição da pressão interna permite aferir a estanquicidade da cápsula. Após o operador confirmar que o sistema está operacional, o registador passa ao estado seguinte.

### **Estado de Aquisição e Armazenamento**

Neste estado os módulos supérfluos à aquisição são desligados para minimizar o consumo do registador, nomeadamente o do GPS e o da comunicação com o PC. Em seguida, o registador começa a recolha e o armazenamento dos dados dos sensores e a cápsula é imersa.

O registador só sai deste estado após recepção do sinal para emersão da cápsula ou quando a tensão no conjunto de baterias que alimenta os módulos de aquisição for inferior a um limiar pré-definido.

### **Estado de Espera por Recolha**

Este estado é iniciado quando o sistema recebe o sinal para a emersão da cápsula enviado pelo barco de recolha ou quando a tensão no conjunto de baterias que alimenta os módulos de aquisição for inferior a um limiar pré-definido. Neste estado o registador desliga os módulos de aquisição (se ainda estiverem em funcionamento) e só inicia a emersão e a activação do módulo GPS quando receber o sinal para a emersão.

Após a emersão e captação dos sinais dos satélites GPS, o sistema regista a hora UTC e transmite periodicamente a sua posição por rádio-frequência.

Depois da recolha da cápsula, os dados podem ser transferidos para o PC através da interface USB ou abrindo a cápsula e retirando a unidade de armazenamento.



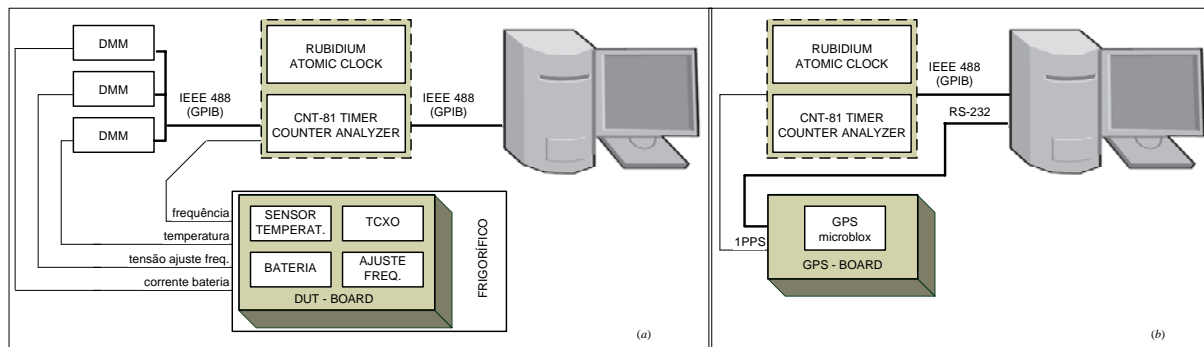
**Figura 3 – Diagrama de estados do sistema.**

## Resultados Experimentais

### Aparato Experimental

Os resultados experimentais foram obtidos com o aparato esquematizado na Figura 4. Os aparelhos de medida utilizados foram: frequencímetro de precisão CNT-81, com base de tempo de Rubídio, ambos da Pendulum; dois multímetros digitais modelo 2000 da Keithley (DMM) e um multímetro digital 34401A da Agilent (DMM).

Todos os aparelhos de medida estão interligados entre si e um computador através de um barramento IEEE488. No teste do módulo GPS usou-se ainda uma interface de comunicações RS-232.



**Figura 4 – Aparato experimental para teste: a) do oscilador; b) do pulso 1PPS do módulo GPS.**

Foi desenvolvido uma aplicação em LabVIEW para configurar os equipamentos de medida, sincronizar e armazenar as suas medições. A aplicação recolhe os dados dos aparelhos e grava-os para um ficheiro. Cada ficheiro gerado contém as medições efectuadas durante uma hora.

### Resultados

Apresenta-se no gráfico da figura 5 a variação da frequência do oscilador (TCXO) para uma variação de temperatura entre  $-2^{\circ}\text{C}$  e  $+3^{\circ}\text{C}$  ao longo de 11 horas. Neste intervalo de temperaturas verifica-se que a estabilidade do oscilador é cerca de 0,15Hz em 10MHz. Realizaram-se outros ensaios que permitiram concluir que num intervalo entre  $+3^{\circ}\text{C}$  e  $+30^{\circ}\text{C}$  se tem uma variação de cerca de 1Hz em 10MHz.

Da característica de transferência frequência/temperatura do TCXO, obtida a partir dos ensaios realizados, é possível ajustar a frequência de oscilação à temperatura ambiente de modo a ter uma frequência de 10MHz no fundo do mar.

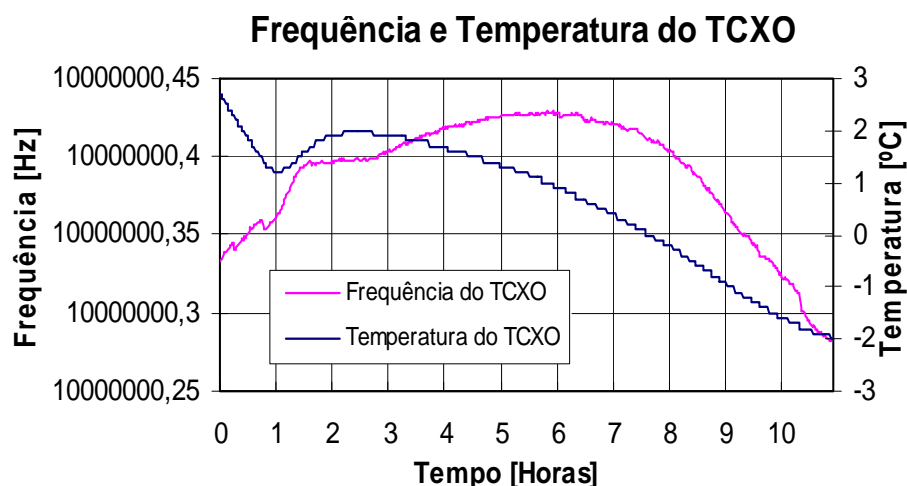


Figura 5 - Frequência e variação da temperatura do TCXO ao longo do tempo.

## Conclusões

A arquitectura do registador, descrito neste artigo, constitui uma solução que utiliza a actual tecnologia para responder de forma integrada aos problemas de estabilidade, sincronismo, autonomia e de localização referidos anteriormente.

Foram apresentados resultados experimentais sobre o desempenho do oscilador, que é um dos módulos do registador. Foram igualmente apresentadas estimativas do consumo dos módulos do registador, sendo o consumo total do registador aproximadamente 330mW, admitindo como unidade de armazenamento uma *CompactFlash* de 4GByte.

A validade das soluções encontradas irá ser testada através de ensaios de campo, a realizar com o protótipo desenvolvido.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às três entidades envolvidas neste projecto: ao Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa pelo desafio proposto no sentido de desenvolver este sistema de aplicação real; ao Instituto Politécnico de Lisboa pelo financiamento concedido (projecto N° 45/2003) que possibilitou a aquisição de equipamento de topo para ensaio e medida, indispensáveis à realização, com qualidade e rigor, dos testes experimentais; e ao Centro de Estudos e Desenvolvimento de Electrónica e Telecomunicações pelo espaço e meios que nos proporcionou.

## Referências

- [1] John R. Vig, "Quartz Crystal Resonators and Oscillators for frequency control and timing applications- A TUTORIAL", February 2005
- [2] R. G. Bookbinder, A. C. Hubbard, W. G. McDonald and P. W. Pomeroy, "Design of an ocean bottom seismometer with response from 25 Hz to 100 seconds", *Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University*, p. 510-515.