

**Departamento de Ingeniería Electrónica
E.T.S.I. Telecomunicación**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

TESIS DOCTORAL

**“ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE RESONANCIA
MAGNÉTICA NUCLEAR MEDIANTE TÉCNICAS
DE SUBMUESTREO”**

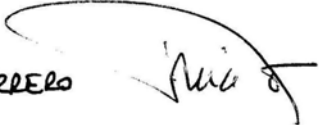
**Autor: Pablo Roberto Pérez Alcázar
Ingeniero de Telecomunicación**

**Director: Andrés de Santos y Lleó
Doctor Ingeniero de Telecomunicación**

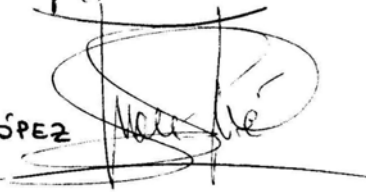
1999

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 1 de Octubre de 1999.

Presidente: D. RICARDO DE CORDOBA HERRALDE 

Vocal: D. FRANCISCO DEL POZO GUERRERO 

Vocal: D. MANUEL DESCO MENÉNDEZ 

Vocal: D. JUAN JOSÉ VAQUERO LÓPEZ 

Secretario: D. FRANCISCO JAVIER CASAJÚS QUIRÓS 

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ...18... de NOVIEMBRE...de 1999

en MADRID

Calificación: SOBRESALIENTE CUM LAUDE

EL PRESIDENTE

R.Có

EL SECRETARIO

LOS VOCALES

RESUMEN

Esta Tesis presenta y evalúa el empleo de la técnica del submuestreo en el procesamiento de la señal de resonancia magnética nuclear (RMN) cuando aún se encuentra en el rango de radiofrecuencias (r.f.), con el propósito de introducir lo antes posible las ventajas potenciales del procesamiento digital, pero tratando a la vez de reducir las exigencias sobre los diferentes componentes electrónicos a utilizar. El objetivo final es lograr un sistema de reconstrucción de imágenes más versátil y de mejor calidad que los comúnmente utilizados en la actualidad.

En el sistema propuesto se reemplazan las etapas analógicas tradicionales de demodulación y filtrado y amplificación en banda de base por un receptor digital directo basado en el submuestreo, reduciendo así los requerimientos de memoria y capacidad de proceso que exige el sobremuestreo. Para este tipo de receptor se establecen las limitaciones que impone el propio proceso de submuestreo y el componente clave en su aplicación, el conversor analógico-digital (CAD). En particular se ha estudiado la degradación producida en la relación señal-ruido (SNR), muy dependiente de la velocidad de muestreo y posición de la banda. Esta degradación se ha acotado, proponiéndose una configuración que permite conseguir resultados similares o mejores a los obtenidos con componentes analógicos más costosos y de comportamiento menos estable.

Los resultados de los experimentos realizados con señales de RMN confirman las predicciones teóricas sobre relocalización de banda espectral, inversión de espectro, bandas de guarda, relación señal-ruido, etc., demostrando que esta técnica, aún con las limitaciones indicadas, permite la aplicación de los procesos digitales a sistemas donde el sobremuestreo no es todavía aplicable (o lo sería a un coste elevado).

Los resultados obtenidos en relación con la utilización del muestreo paso-banda (submuestreo) en el proceso de adquisición de imágenes han sido satisfactorios, ya que con ellos se ha logrado la reconstrucción correcta de la información de fase y frecuencia de la imagen. Estos resultados también han mostrado que, dependiendo del tipo de sistema de RMN utilizado, es necesario establecer un método de compensación de fluctuaciones de fase debidas a la incoherencia de los pulsos de excitación.

ABSTRACT

This Thesis presents and evaluates the use of undersampling to acquire NMR signals directly at intermediate frequency or in radio frequency (r.f.) range with the purpose of introducing early in the receiver the potential advantages of the digital signal processing. The application of undersampling tries to reduce the requirements of several electronic components to be used. The ultimate objective being the realization of a more versatile and a better quality image reconstruction system than those commonly used at the present time.

The proposed system uses a direct digital receiver based on undersampling or passband sampling, which permits to replace some traditional analogue stages such as the quadrature phase detection and the baseband filtering and amplification. The limitations of this type of receiver due to the undersampling and the features of the key component used for its application, the analog-to-digital converter (ADC), have been established. In particular, the degradation in signal-to-noise ratio in terms of sampling rate and position of the signal has been studied. The degradation has been bound and an architecture that permits to get similar or better results than those obtained with more expensive and less stable analogue components is proposed.

The experimental results with NMR signals confirm the theoretical predictions about spectral band relocation, spectral inversion, guard-bands, signal-to-noise ratio, etc.. The results show that undersampling, even with its limitations, permits the use of digital processing in systems where oversampling is not available yet (or it could be at a high cost).

The results related to the application of undersampling in the acquisition of images have been quite satisfactory because they have allowed the correct reconstruction of the phase and frequency information of the image. These results have also shown that, depending on the NMR equipment, it is necessary to establish a method to compensate the phase fluctuations due to the incoherence of the excitation pulses.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	VII
ÍNDICE	IX
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
TABLA DE SÍMBOLOS	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE Y MOTIVACIÓN.....	2
1.1.1 <i>Sistema de RMN</i>	2
1.1.2 <i>Técnicas y circuitos digitales con aplicación a la recepción de señales de RMN</i>	5
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	13
CAPÍTULO 2. ASPECTOS TEÓRICOS.....	17
2.1 MUESTREO.....	17
2.1.1 <i>Aproximaciones a la teoría del muestreo</i>	18
2.1.2 <i>El muestreo uniforme ideal como proceso de modulación</i>	19
2.1.3 <i>Muestreo con pulsos de duración finita</i>	26
2.1.3.1 Muestreo natural.....	26
2.1.3.2 Muestreo con retención de orden cero.....	30
2.1.4 <i>Muestreo paso-banda directo (Submuestreo)</i>	34
2.1.5 <i>FFT de alta resolución (zFFT) y Diezmado</i>	42
2.1.5.1 Diezmado	47
2.2 RUIDO Y DISTORSIÓN RELACIONADOS CON LA APLICACIÓN DEL MUESTREO Y LA CUANTIFICACIÓN..	55
2.2.1 <i>Ruido de cuantificación</i>	56
2.2.1.1 Cuantificación uniforme.....	56
2.2.2 <i>Ruido por solapamiento</i>	62
2.2.3 <i>Comparación teórica con el proceso analógico tradicional</i>	66
2.2.4 <i>Otros efectos introducidos por la operación del conversor A/D</i>	69
2.2.4.1 Muestreo no uniforme	77
2.2.5 <i>Conversor sigma-delta ($\Sigma\text{-}\Delta$)</i>	83
2.2.5.1 Modulación sigma-delta de primer orden.....	84
2.2.5.2 Conversor sigma-delta paso-banda.....	91
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODO	97
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO	97
3.1.1 <i>Sistemas de resonancia magnética utilizados</i>	97
3.1.2 <i>Sistema de adquisición</i>	100
3.2 EXPERIMENTOS Y MÉTODO DE PROCESAMIENTO EMPLEADO	105
3.2.1 <i>Métodos de corrección de fase</i>	106
3.2.2 <i>Experimentos relacionados con el procesamiento de la señal</i>	108
3.2.3 <i>Experimentos relacionados con reconstrucción de imagen</i>	117
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y EVALUACIÓN.....	121
4.1 RELACIONADOS CON SEÑAL	121
4.2 RELACIONADOS CON RECONSTRUCCIÓN DE IMAGEN	132
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	137
BIBLIOGRAFÍA.....	141