

Materiales ferroeléctricos. *Importancia económica y Aplicaciones.*

| | | |
|-----------|---|----|
| 1.1.- | Introducción..... | 1 |
| 1.2.- | Aspectos económicos, científicos, técnicos y áreas de aplicación de los materiales ferroeléctricos. . | 4 |
| 1.2.1.- | Mercado mundial de materiales ferroeléctricos..... | 4 |
| 1.2.2.- | Resultados científico-técnicos..... | 5 |
| 1.2.3.- | Sectores socioeconómicos de aplicación de los materiales ferroeléctricos..... | 10 |
| 1.2.3.1.- | Componentes eléctricos y electrónicos..... | 10 |
| 1.2.3.2.- | Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)..... | 11 |
| 1.2.3.2.1 | Comunicaciones ultrasónicas..... | 11 |
| 1.2.3.2.2 | Comunicaciones ópticas..... | 11 |
| 1.2.3.3.- | Robótica y automatismos..... | 12 |
| 1.2.3.4.- | Automóvil..... | 12 |
| 1.2.3.5.- | Medioambiente..... | 13 |
| 1.2.3.6.- | Medicina..... | 13 |
| 1.2.3.7.- | Informática y telemática..... | 14 |
| 1.2.3.8.- | Sistemas de análisis no destructivos. Control de calidad..... | 15 |

1.1.- *Introducción.*

La Ferroelectricidad es un fenómeno físico descubierto en 1921. La principal característica asociada a esta propiedad, es que los materiales ferroeléctricos presentan polarización espontánea, **P**, y que ésta responde de forma no lineal con el campo de polarización, **E**, permitiendo su inversión. Por otra parte, este fenómeno lleva asociados otros fenómenos, como son la piroelectricidad y la piezoelectricidad, básicos en el desarrollo de dispositivos y aplicaciones.

Fue en la década de los 50, con el descubrimiento del Titanato de Bario, cuando tuvo lugar el primer salto cualitativo importante en la investigación de propiedades y desarrollo de dispositivos basados en este fenómeno. El Titanato de Bario sirvió de base para el desarrollo de condensadores cerámicos y para el desarrollo de aplicaciones basadas en transductores piezoeléctricos. A partir de este momento, tanto el número como el tipo de materiales descubiertos con estas propiedades se multiplicaron, hasta el punto de disponer en este momento de materiales ferroeléctricos monocristalinos, cerámicos, poliméricos, cristales líquidos o lámina delgada y combinaciones con otros materiales tanto ferroeléctricos, en cualquiera de sus morfologías, como no ferroeléctricos.

Hablar de las aplicaciones de estos materiales, implica referirse por una parte a elementos muy simples y de gran desarrollo e implantación en la sociedad (encendedores de gas, dispositivos sonoros, sensores de apertura automática, detectores de presencia... etc.) y por otra, a dispositivos sumamente complejos y sofisticados como los avanzados sistemas ecográficos, los sistemas de Termografía Infrarroja de tercera generación, o los sistemas de integración óptica.

Para tener una visión general tanto de las aplicaciones como de la importancia socioeconómica y científica de estos materiales, dividiremos este capítulo en tres grandes bloques.

- El primero de ellos corresponde a una visión socioeconómica de estos materiales y de sus aplicaciones, aportando datos mercado, número de patentes y de publicaciones científicas en los últimos años. Todo ello está relacionado con importantes sectores económicos, por lo que se presenta una visión general de las aplicaciones de los materiales ferroeléctricos, pero en lugar de en función de las propiedades de los materiales, viendo su uso en diferentes áreas de actividad socioeconómica de especial relevancia, (electrónica, comunicaciones, informática, medicina, medioambiente....etc).
- Posteriormente nos centraremos una de las propiedades y campos de aplicación de mayor interés que corresponde a materiales ferroeléctricos con aplicaciones piezoeléctricas. En este apartado, comentaremos algunos de los fundamentos físico-químicos de la piezoelectricidad, haremos una reseña histórica de este importante fenómeno, y pondremos de manifiesto diversas aplicaciones, que, a pesar de basarse en conceptos tradicionalmente conocidos, la mejora y optimización de materiales, junto con los avances en microelectrónica e informática, han dado nuevo impulso y han aumentado de forma notable sus campos de aplicación.
- Por último, analizaremos las propiedades piroeléctricas y ópticas, relacionando las primeras con sensores de infrarrojo, de amplia utilización en automatismos, y en cámaras de visión infrarroja, y las segundas, con una nueva modalidad de materiales ferroelectricos, "ferro-antiferreelectric liquid crystals", que llevan camino de revolucionar un mercado tan activo como el de las comunicaciones, al permitir monitores, pantallas o "displays" de visión de muy alta resolución tanto para televisores, monitores de PC-computers, notebook, relojes, teléfonos celulares....etc.

Gran parte de los principios científico-técnicos han sido tratados en otros capítulos de este libro, por lo que nuestro objetivo fundamental será poner de manifiesto la importancia socioeconómica de estos materiales, y la profunda implantación social que tienen a pesar del desconocimiento de su existencia por gran parte no solo de la sociedad, sino de la comunidad científica.

1.2.- Aspectos económicos, científicos, técnicos y áreas de aplicación de los materiales ferroeléctricos.

1.2.1.- Mercado mundial de materiales ferroeléctricos

El mercado mundial de los materiales ferroeléctricos, es muy importante, y se encuentra en un periodo de clara expansión lo que hace que año tras año adquiera niveles de importancia mayores en las diferentes áreas de actividad económica.

Pretendemos poner de manifiesto tanto el interés económico, tecnológico y científico de estos materiales. Por ello, presentaremos resultados referentes a la facturación mundial y su distribución por países (interés económico), así como el número de patentes presentado (tecnológico), y el de publicaciones científicas asociadas (científico-técnico)

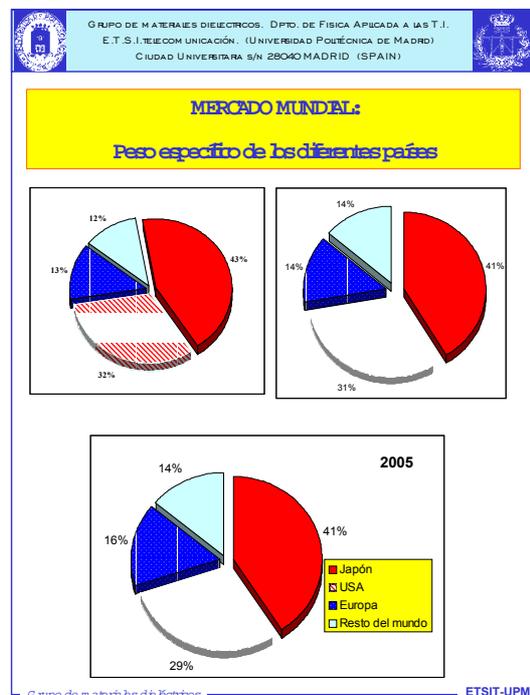
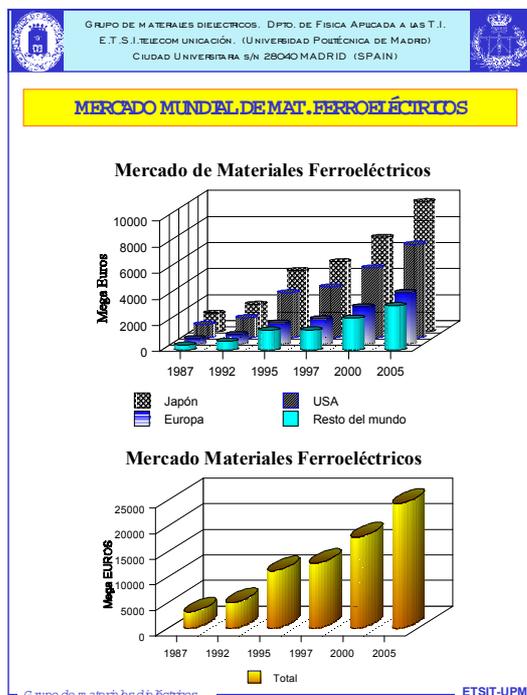


Figura 1 a. Volumen de negocio mundial asociado a los materiales ferroeléctricos

Figura 1 b. Distribución por países del mercado mundial de materiales ferroeléctricos.

El mercado mundial de los materiales ferroeléctricos, y su proyección en los próximos años, es:

| | 1987 | 1992 | 1995 | 1997 | 2000 | 2005 * |
|------------------------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| Europa | 420 | 735 | 1610 | 1940 | 2860 | 3940 |
| USA | 1020 | 1530 | 3450 | 3900 | 5350 | 7150 |
| Japón | 1400 | 2100 | 4672 | 5350 | 7226 | 9947 |
| Resto del mundo | 380 | 680 | 1530 | 1535 | 2450 | 3400 |
| Total | 3220 | 5045 | 11262 | 12725 | 17886 | 24437 |

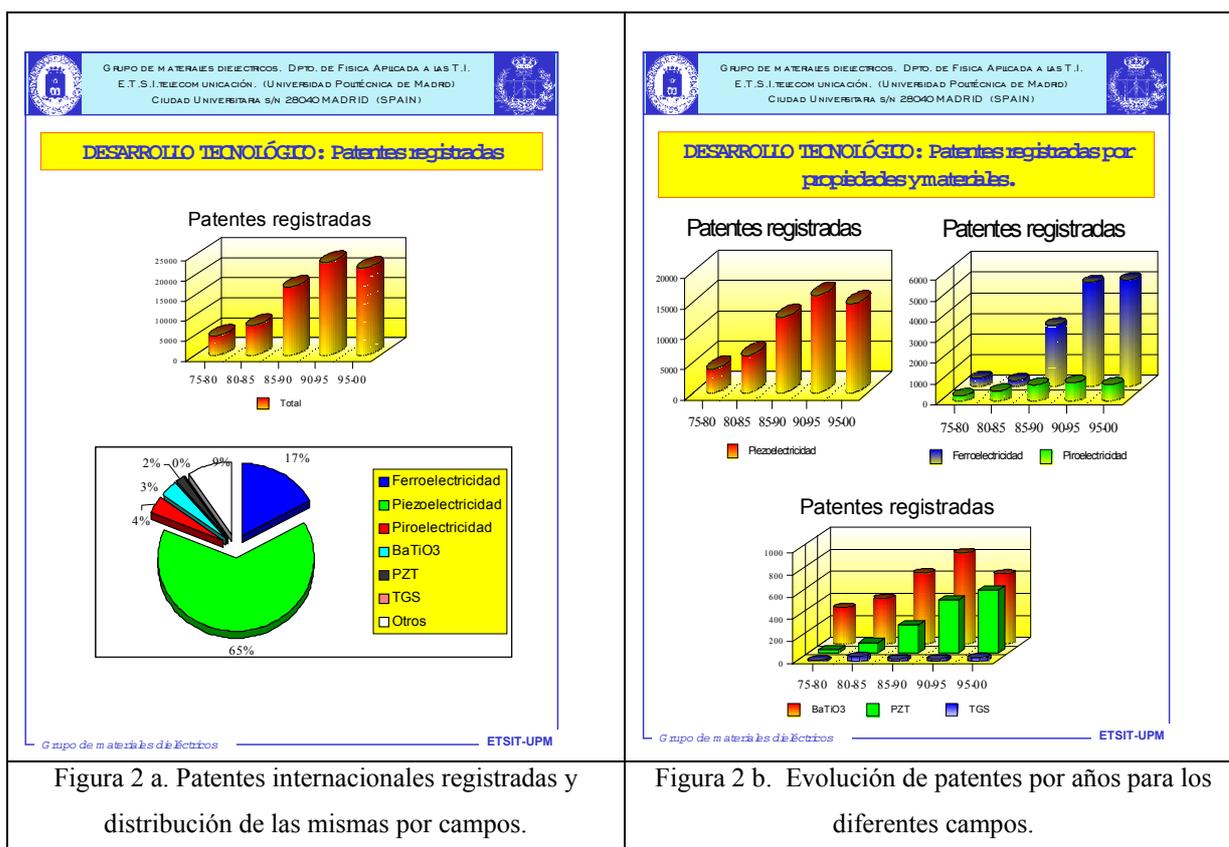
Estos mismos resultados son los que se recogen en la figura 1. Analizando los datos, se pone manifiesto un claro dominio de las empresas japonesas con prácticamente el 50 % del mercado mundial. Estas empresas, aunque ligeramente tienden a perder cuota de mercado, a favor de las empresas de la unión europea, que presentan una progresión muy fuerte, habiendo pasado de algo menos de un 13 % del mercado mundial en 1987, a un 15 % en el 2000, y estimarse unas previsiones superiores al 17 % para el año 2005. En una situación intermedia, aunque también con una tendencia a perder cuota de mercado, se encuentra USA, que ha pasado de controlar el 32 % a estar por debajo del 30 %. Otro aspecto a destacar es la presencia de otros países que empiezan a tener importancia a nivel mundial, como sucede fundamentalmente con los países asiáticos.

En todo caso, el negocio de los materiales ferroeléctricos en los últimos años muestra un crecimiento muy alto, superior en todo caso al 7 % anual, y con picos de crecimiento en periodos concretos muy elevados (por ejemplo, en el periodo 1992-1995 el crecimiento medio anual fue superior a un 30 %), que es al menos dos veces superior a la media del crecimiento de su sector económico.

1.2.2.- Resultados científico-técnicos

En el apartado anterior, hemos puesto de manifiesto el importante mercado de los materiales ferroeléctricos, lo que puede llevar a la conclusión errónea de que los materiales ferroeléctricos es algo perfectamente conocido, y que aporta poca al panorama científico. Nada más lejos de la realidad. El estudio de los materiales para su optimización, el desarrollo de nuevos materiales o morfologías de los mismos, y fundamentalmente, el conocer los fundamentos físico-químicos que gobiernan las diferentes propiedades de estos materiales, constituye uno de los campos de estudio más dinámicos de la física del estado sólido.

Haciendo una revisión estadística de los últimos años, puede comprobarse el gran número de artículos científico técnicos publicados sobre este tema en revistas científicas internacionales inscritas en el SCI, por otra parte, existen varias revistas especializadas en este tipo de materiales y propiedades. De forma complementaria, y como consecuencia de este desarrollo científico, está el importante desarrollo de patentes de invención sobre procesos, materiales, o dispositivos. En las siguientes figuras se reflejan estos resultados.



Si el estudio económico pone de manifiesto el interés comercial de estos materiales, los resultados científicos son mucho más notables. En la figura 3 se recogen los artículos publicados en el periodo de 1995 hasta el primer semestre de 2000. En este periodo se han publicado más de 100.000 artículos en revistas de la máxima relevancia científica. De estos más de las tres cuartas partes son artículos puramente científicos, con estudio y desarrollo de principios físico-químicos o desarrollo de nuevos materiales, y menos de un 25 % corresponde a desarrollos o aplicaciones basadas en estos materiales. La preponderancia de las áreas de estudio se invierte entre los artículos puramente científicos y los aplicados o de desarrollo.

En la figura 3B se representa la evolución por años y campos de estudio de las aplicaciones y desarrollos. Estos resultados quedan directamente relacionados con el número de patentes e invenciones registrados a nivel mundial sobre este campo. La figura 2 pone de manifiesto la fuerte evolución en el número de patentes y poniendo de manifiesto que casi dos tercios de las patentes corresponden a invenciones relacionadas con la piezoelectricidad, que es quien marca la tendencia general. En los últimos años se ha conseguido desarrollar a gran escala numerosos materiales ferroeléctricos en forma de lámina delgada. Esto ha hecho que propiedades que requerían grandes campos aplicados se puedan conseguir con pocos voltios.

Esto ha permitido el auge en el número de patentes directamente relacionadas con la ferroelectricidad que han pasado de ser algo testimonial, a representar casi un 20 % del número total de patentes, y mientras en los otros campos el número de patentes tiende a estancarse o a aumentar suavemente, aquí se duplica de año en año.

Si el estudio económico pone de manifiesto el interés comercial de estos materiales, los resultados científicos son mucho más notables. En la figura 3 se recogen los artículos publicados en el periodo de 1995 hasta el primer semestre de 2000. En este periodo se han publicado más de 100.000 artículos en revistas de la máxima relevancia científica. De estos más de las tres cuartas partes son artículos puramente científicos, con estudio y desarrollo de principios físico-químicos o desarrollo de nuevos materiales, y menos de un 25 % corresponde a desarrollos o aplicaciones basadas en estos materiales. La preponderancia de las áreas de estudio se invierte entre los artículos puramente científicos y los aplicados o de desarrollo.

En la figura 3B se representa la evolución por años y campos de estudio de las aplicaciones y desarrollos. Estos resultados quedan directamente relacionados con el número de patentes e invenciones registrados a nivel mundial sobre este campo. La figura 2 pone de manifiesto la fuerte evolución en el número de patentes y poniendo de manifiesto que casi dos tercios de las patentes corresponden a invenciones relacionadas con la piezoelectricidad, que es quien marca la tendencia general. En los últimos años se ha conseguido desarrollar a gran escala numerosos materiales ferroeléctricos en forma de lámina delgada. Esto ha hecho que propiedades que requerían grandes campos aplicados se puedan conseguir con pocos voltios. Esto ha permitido el auge en el número de patentes directamente relacionadas con la ferroelectricidad que han pasado de ser algo testimonial, a representar casi un 20 % del número total de patentes, y mientras en los otros campos el número de patentes tiende a estancarse o a aumentar suavemente, aquí se duplica de año en año.

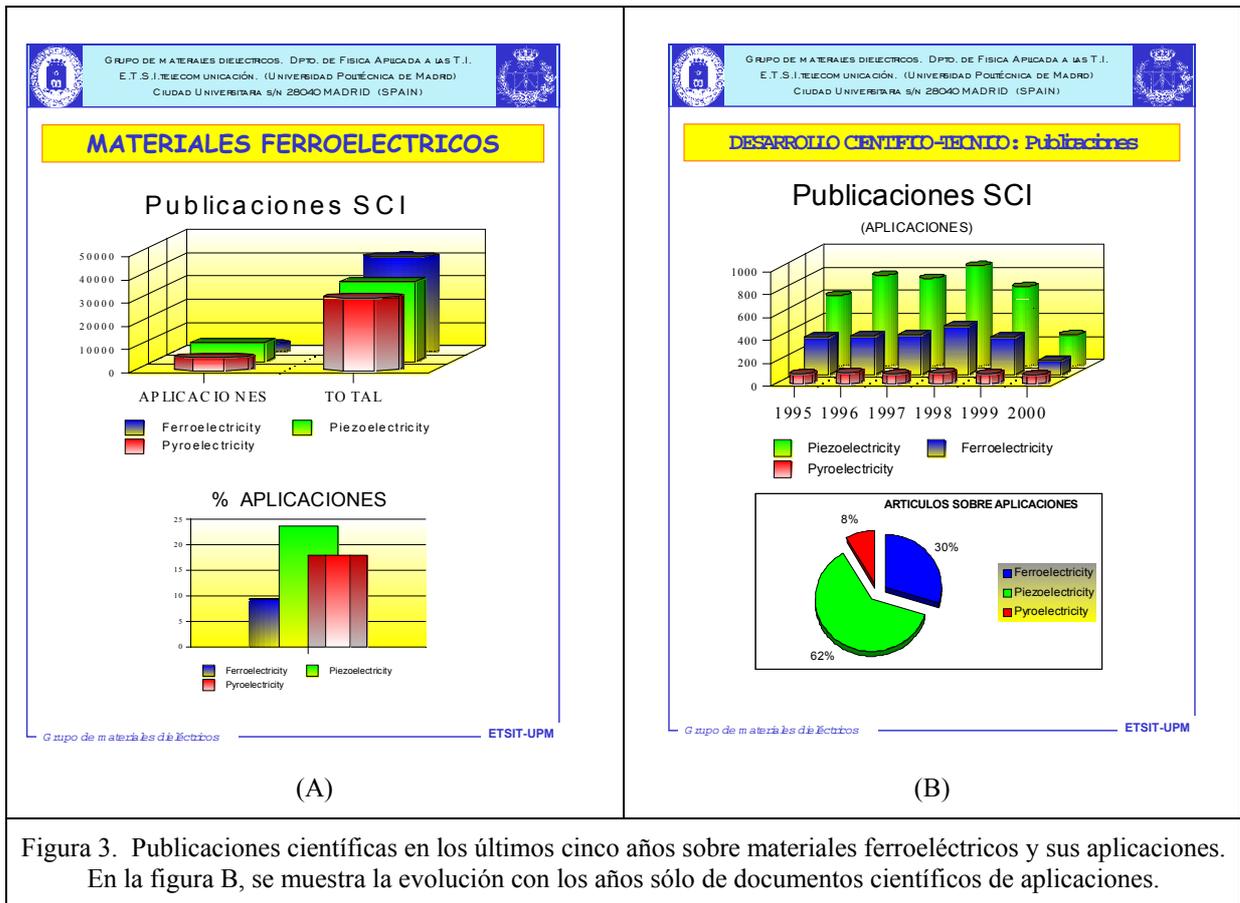


Figura 3. Publicaciones científicas en los últimos cinco años sobre materiales ferroeléctricos y sus aplicaciones. En la figura B, se muestra la evolución con los años sólo de documentos científicos de aplicaciones.

Combinando los resultados presentados tanto a nivel económico como científico-técnico, se pone de manifiesto que es un campo muy activo que combina perfectamente los estudios científicos con los desarrollos técnicos, las patentes e invenciones y por último la comercialización. Pero si esto es así, ¿dónde están los materiales ferroeléctricos?. En realidad están presentes en prácticamente todos los dispositivos o electrónicos, o elementos que los constituyan.



MATERIALES FERROELECTRICOS

- Oscilador de microondas
- Filtro de microondas
- Resonador cerámico
- Filtro SAW de alta frecuencia
- Filtros Cerámicos
- Receptores piezoeléctricos (altavoz)
- Emisores piezoeléctricos (micrófono)
- Teclado
- Condensador cerámico en chip monolítico
- Filtro LC monolítico
- Pantalla de alta resolución

Figura 4. Elementos de un teléfono celular constituidos para materiales ferroeléctricos.

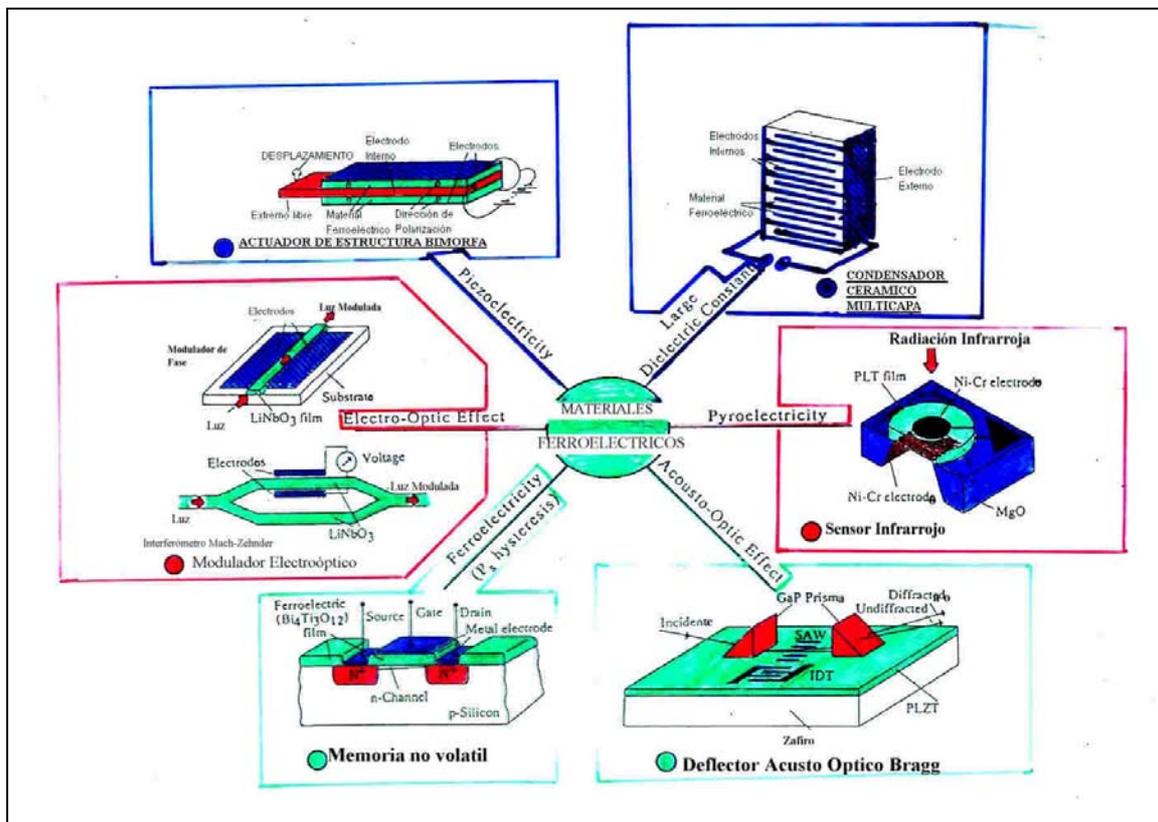


Figura 6. Algunas de las propiedades físico químicas asociadas a los materiales ferroeléctricos, y aplicaciones asociadas.

1.2.3.- Sectores socioeconómicos de aplicación de los materiales ferroeléctricos.

Hablar de las aplicaciones de estos materiales, implica referirse por una parte a elementos muy simples y de gran desarrollo e implantación en la sociedad (encendedores de gas, dispositivos sonoros, sensores de apertura automática, detectores de presencia... etc.) y por otra, a dispositivos sumamente complejos y sofisticados como los avanzados sistemas ecográficos, los sistemas de Termografía Infrarroja de tercera generación, o los sistemas de integración óptica. Para dar una visión general de las mismas, presentaremos algunas aplicaciones en diferentes áreas de actividad.

1.2.3.1.- Componentes eléctricos y electrónicos

La primer aplicación de estos materiales fue el desarrollo de condensadores cerámicos, que en la actualidad representa del orden del 20 % del mercado mundial de componentes. Aplicaciones posteriores, como filtros cerámicos, elementos de integración en circuitos integrados, dispositivos activos, convertidores ...etc., se fundamentan en este tipo de materiales. En la figura 7 puede verse algunos de estos elementos.

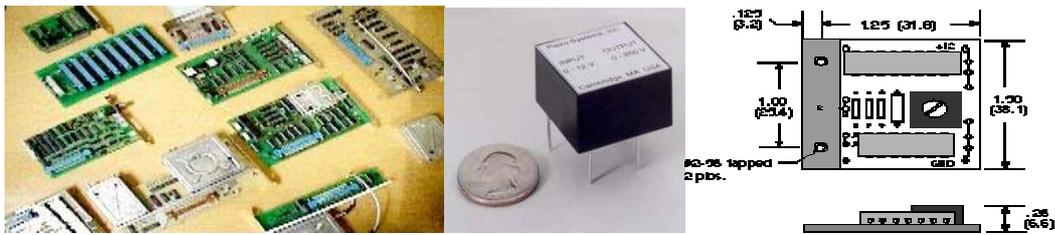


Figura 7. Componentes electrónicos en placas integradas, condensador de alta capacidad, y esquema de un dispositivo activo.

1.2.3.2.- Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)

Uno de los sectores económicamente más dinámico es el de las TIC. El papel que desempeñan los materiales ferroeléctricos en ellas es fundamental. Anteriormente, hemos comentado los elementos basados en materiales ferroeléctricos que constituyen un teléfono celular. De la misma forma, estos elementos son claves en los sistemas de transmisión, recepción y codificación de las comunicaciones por microondas, sin embargo, esto es lo menos importante en cuanto a la importancia de estos materiales en las TIC. Vamos a comentar aquellos aspectos en los que su papel ha sido y es más relevante.

1.2.3.2.1 Comunicaciones ultrasónicas.

Una de las primeras aplicaciones de los ultrasonidos, fue el desarrollo de sistemas SONAR para detección y comunicación submarina. La utilización de nuevos materiales, implica la mejora permanente de estos sistemas, llegando a niveles sumamente sofisticados, a los que con el complemento de sistemas informáticos, es difícil fijar límites. Muestra de ello, es la implantación de los sistemas de Ondas Acústicas Superficiales (SAW) para la detección e identificación de aviones, codificación de señales... etc.

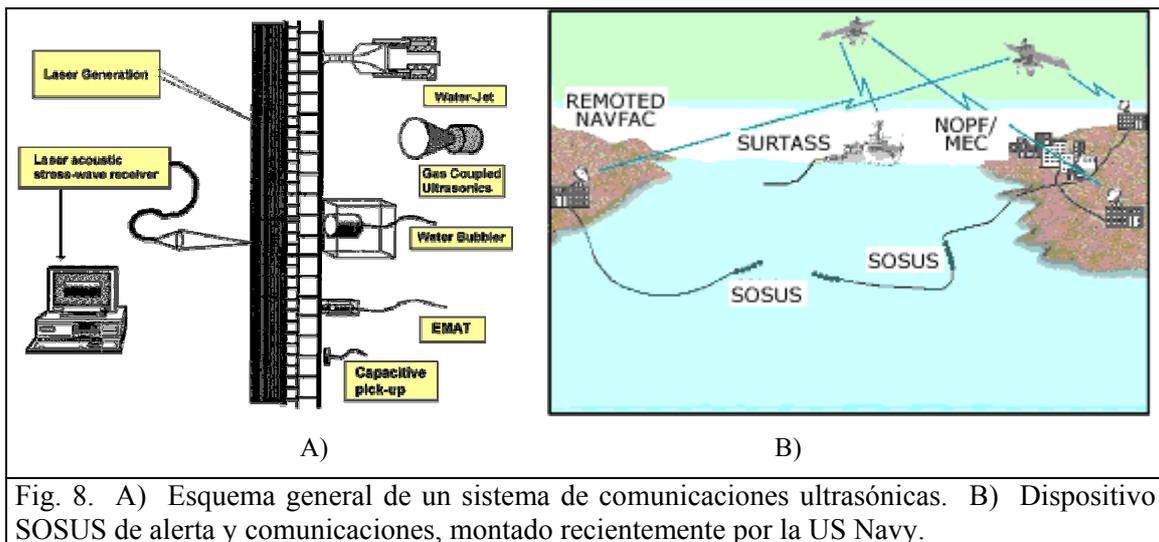


Fig. 8. A) Esquema general de un sistema de comunicaciones ultrasónicas. B) Dispositivo SOSUS de alerta y comunicaciones, montado recientemente por la US Navy.

1.2.3.2.2 Comunicaciones ópticas.

El desarrollo de las comunicaciones ópticas en los últimos años, está sustentado en gran medida en este tipo de materiales. Gracias a ellos, se pueden realizar los sistemas de óptica integrada, se han desarrollado moduladores lineales de Electro-Optica (EO), moduladores de paso de onda, guías de onda, filtros, dispositivos de modulación EO, redes de difracción de Bragg, cambiadores de frecuencia, polarizadores, y un sinfín de componentes imprescindibles para que puedan darse este tipo de comunicaciones

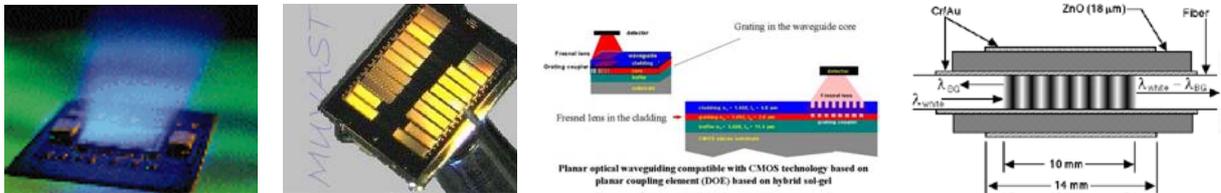


Fig. 9. Diferentes elementos electro-ópticos de aplicación en comunicaciones. Moduladores, filtros, guía de ondas, acoplador-desacoplador de longitudes de onda.

1.2.3.3.- Robótica y automatismos.

Los materiales ferroeléctricos resultan elementos fundamentales en el desarrollo de sistemas sensores, tanto de presión como de temperatura o de proximidad. Esto hace que en gran medida, los "órganos sensoriales" de los robots estén constituidos por materiales ferroeléctricos. El bajo costo de estos elementos sensores, unidos a su fiabilidad, bajo mantenimiento y alta sensibilidad son sus aspectos más destacados. Por otra parte, el desarrollo de motores y micromotores ultrasónicos, permiten con un bajo consumo de energía, grandes eficiencias en el control de los procesos.



Figura 10. Diferentes elementos de movimiento y desplazamiento (micromotores, actuadores, posicionadores de dos dimensiones, y de rotación, motores... etc).

1.2.3.4.- Automóvil

Como en la mayoría de los sectores industriales, los materiales ferroeléctricos suelen desempeñar una doble actuación. Por una parte, actúan como elementos sensores pasivos (se utilizan en la mayoría de

los dispositivos de seguridad, como por ejemplo en la activación de sistemas "air-bag", medida de temperatura, presión, control de niveles, reglaje de cinturones de seguridad, etc.), y por otra como elementos activos (elementos de encendido electrónico (sin bujías), sistemas de almacenamiento y transformación de energía (vehículos eléctricos), sistemas de visión nocturna y radar por ultrasonidos, alarmas, sistemas remotos, automatismos, etc.



Figura 11. Control y estudio de elementos con ultrasonidos. Ubicación de elementos sensores y automatismos ferroelectricos en un vehículo. Detalle del dispositivo air-bag. Elementos de conducción inteligente basados en dispositivos ferroeléctricos.

1.2.3.5.- Medioambiente.

En el área de medioambiente, este tipo de materiales desempeña una doble tarea. Por una parte, como elementos sensores robustos, económicos y de alta sensibilidad, se utilizan como sensores de gases incluso en ambientes agresivos, como detectores precoces de incendio, como medidores de ruido ambiental o incluso como sistemas de determinación de contaminantes en flujos tanto de líquidos como de gases. Por otra, son elementos activos utilizados como atenuadores de ruido, como sistema de depósito de sólidos, o incluso como elementos de conversión de energía alternativos, equivalentes a los paneles solares

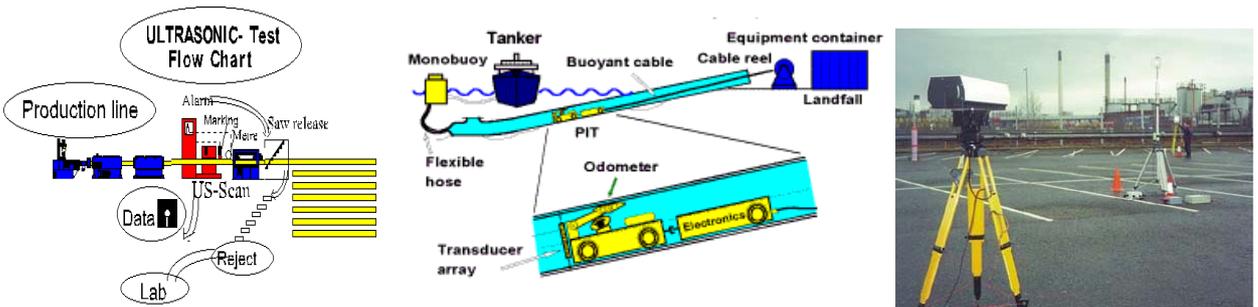


Figura 12. Control por ultrasonidos de un fluido. Sistema de inspección y control de tubos de conducción de fuel. Sensor medioambiental de gases

1.2.3.6.- Medicina

Desde los años 60 se vienen utilizando los materiales ferroeléctricos como elementos básicos en medicina para la monitorización de órganos o fetos (Sistemas Ecográficos) o para el tratamiento de cólicos renales, y la destrucción de piedras en el riñón, haciendo uso de dispositivos ultrasónicos, y de sistemas de análisis termográficos basados en vidicones y termocámaras, haciendo uso de sensores

piroeléctricos. Con el desarrollo de nuevos materiales, y la mejora de sus propiedades, los niveles de monitorización alcanzados, tanto en sistemas ecográficos como termográficos, son altísimos, permitiendo en la actualidad el seguimiento de arritmias cardiacas, la determinación del flujo sanguíneo, la detección de tejidos defectuosos, cáncer de colon y un sinfín de patologías, imposible de ser detectada por otras técnicas, y en todo caso, sin los efectos secundarios asociados a Rayos X o sistemas de análisis basados en radiación con ondas electromagnéticas.

Desde los años setenta, se utilizan además dispositivos y aplicaciones basadas en estos materiales para el tratamiento de diferentes patologías, fundamentalmente en procesos de rehabilitación, en cirugía y en odontología. Como muestra, podemos referirnos a las sondas rectales de análisis, detección y microcirugía ultrasónica de cáncer de colon, aunque el número de aplicaciones en este campo aumentan día a día.



Figura 13. a) Diferentes tipos de sondas ferroelectricas de ultrasonidos para análisis y tratamiento. b) Imagen de infrarrojos del cuerpo humano. c) Sistema de ecografía ultrasónica. d) Imagen de flujo sanguíneo cerca del corazón mediante ecografía de efecto doppler.

1.2.3.7.- Informática y telemática

Es uno de los campos que ha sufrido una evolución más rápida en los últimos años, y en gran parte esta evolución se fundamenta en materiales ferroeléctricos. Prescindiendo de los dispositivos integrados, de los componentes electrónicos, y de la capacidad e integración de los mismos tanto sistemas de almacenamiento de información (memorias RAM, DRAM, FRAM), como complementos y dispositivos están fundamentados en estos materiales. Muestras de ello, son los diferentes tipos de pantallas y "displays" (cristal líquido ferroeléctrico), teclados y ratones de alta fiabilidad, transmisión inalámbrica de información (lo que reduce el uso de cables en las conexiones) o las populares impresoras de chorro de tinta (el impulsor es un ferroeléctrico)

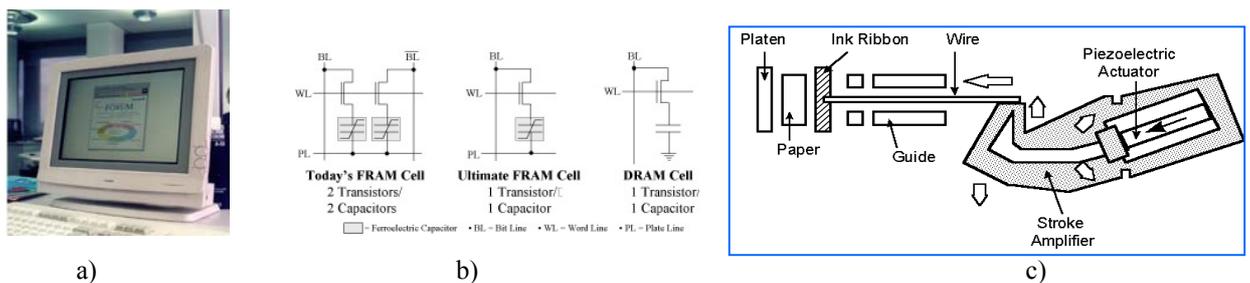


Figura 14. a) Pantalla de cristal líquido ferroeléctrico desarrollado por Sony. b) Esquema de las diferentes memorias ferroelectricas (FRAM y DRAM). c) Esquema de inyector en impresora de chorro de tinta.

1.2.3.8.- Sistemas de análisis no destructivos. Control de calidad.

Es posible, que sea una de las áreas de actividad que más dependen de este tipo de materiales. La calidad en materiales para aplicaciones especiales, la detección de inhomogeneidades o defectos, la calidad en el ensamblaje de los mismos (automovilismo, aviación, oleoductos, gasoductos, centrales nucleares,...), así como detección de fatigas o fisuras, son algunas de las múltiples aplicaciones de los materiales ferroeléctricos. Prácticamente todos los sistemas de análisis no destructivo incluyen alguna técnica basada en este tipo de materiales.

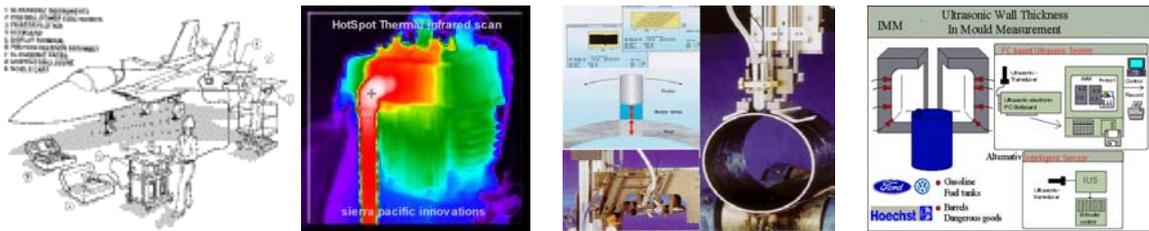


Figura 15. Análisis de grietas y fatiga de materiales por ultrasonidos en un avión. Fugas térmicas en un motor. Sondas de inspección ultrasónica. Control de fisuras en depósitos de combustible de automóviles.