

Desarrollo de un protocolo para comunicaciones inalámbricas e implementación en dispositivos de lógica reconfigurable

Alvarez G, Pico J, Vicario L, Amuchastegui C, Ayuso N, Benitez N
Facultad de Informática, San Sebastián, Spain,
gonzalo@si.ehu.es
<http://www.si.ehu.es/>

Resumen. En este trabajo se presenta un sistema de comunicación inalámbrica implementado sobre dispositivos de lógica reconfigurable. El sistema tiene una estructura modular para permitir una fácil adaptación a los diferentes componentes de comunicación por RF comerciales (transceivers), y posibilita la utilización de diferentes bandas de comunicación libres en función de los requerimientos de velocidad de transmisión, alcance y consumo de las aplicaciones en las que se quiera utilizar. Sigue un modelo de comunicación maestro-esclavo con un protocolo con política de retransmisión Stop an Wait modificado. Se han realizado varias implementaciones para varios transceivers pertenecientes a la banda de las frecuencias de 434 MHz y a la de 2.4GHz. Además se ha desarrollado un sistema de test para estimar los parámetros del sistema (velocidad, distancia, tamaño de paquetes) más apropiados para cada aplicación. El diseño modular del sistema ha permitido que estos momentos se puedan probar diferentes características de protocolo como métodos de codificación de trama y otras políticas de retransmisión.

1 Introducción

El auge de las comunicaciones inalámbricas ha ocasionado su utilización en entornos cada vez más diversos. El grupo de DCI de la Facultad de Informática de San Sebastián tiene amplia experiencia en la realización de proyectos de aplicación de tecnologías electrónicas en diferentes entornos. En dichas aplicaciones aparece la necesidad de comunicación inalámbrica bidireccional entre una serie de dispositivos aislados y un host (CPU).

La implementación del sistema sobre dispositivos de lógica reconfigurable con una estructura modular permite una fácil adaptación a los diferentes componentes de comunicación por RF comerciales (transceivers), posibilitando la utilización de diferentes bandas de comunicación libres en función de los requerimientos de velocidad de transmisión, alcance y consumo.

2 Descripción general del sistema inalámbrico.

El modelo seleccionado para la implementación del protocolo ha sido el modelo Maestro-Escavo. El sistema permite comunicar a varios elementos aislados (esclavos) con un módulo central (maestro), en el que el control de la comunicación está dirigida por el módulo central (Fig. 1). Con este modelo se evita la posibilidad de que ocurran colisiones a la hora de realizar una transmisión, ya que en todo momento el maestro controla quien tiene acceso a la línea. En el entorno de aplicación el maestro está conectado a un host (PC/PDA) mediante una línea de comunicación (RS232 o USB). La función del host es por un lado configurar el maestro con la lista de los esclavos a comunicar y por otro gestionar la comunicación bidireccional con cada esclavo.

El módulo maestro encuesta a cada uno de los esclavos (por turno circular). Para ello, envía un paquete a un esclavo proporcionándole un turno de comunicación, el esclavo le contestará con uno o varios paquetes en función de los datos que necesite transmitir. El maestro también puede enviar datos a un esclavo cuando se comunica con él.

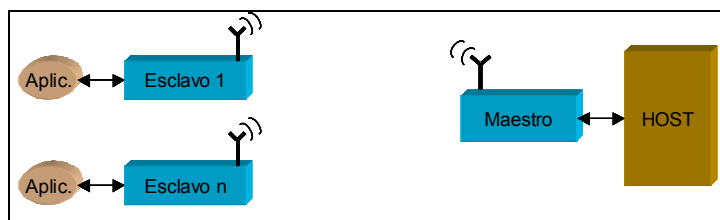


Fig. 1. Esquema de comunicación Mestro-Escavos, varios elementos aislados(eslavos) se quieren comunicar con un módulo central (maestro).

El protocolo desarrollado se trata de un protocolo a medida que implementa un formato de tramas y capas de las pilas de protocolo similares a las de un protocolo estándar [1].

Se ha estructurado en tres capas: capa física, capa de acceso al medio (MAC) y capa de control de enlace lógico (LLC), estas dos últimas son en realidad subcapas del nivel de enlace de datos. En la figura 2 se puede observar el formato de los paquetes de cada capa. Dada la naturaleza de las aplicaciones a las que va dirigido este protocolo, las capas superiores no se han implementado.

La capa física y la capa MAC de los dos elementos de comunicación (maestro y esclavo) son idénticas, siendo propia de cada módulo la capa de LLC.

Algunos transceivers comerciales, ofrecen una capa física y de enlace implementada en el propio transceiver (nRF2401 [2]), en ese caso el protocolo se simplifica, quedando únicamente el nivel LLC. En otros transceivers [3],[4],[5] y [6] en cambio es necesario implementar todas las capas. Se han realizado implementaciones para los transceivers de AUREL y Nordic.

El modelo de comunicación utilizado ha sido el STOP&WAIT pero con características que facilitan su adaptación a un modelo de ventana deslizante (en estos momentos en fase de adaptación). En los siguientes apartados pasamos a detallar cada capa del protocolo.

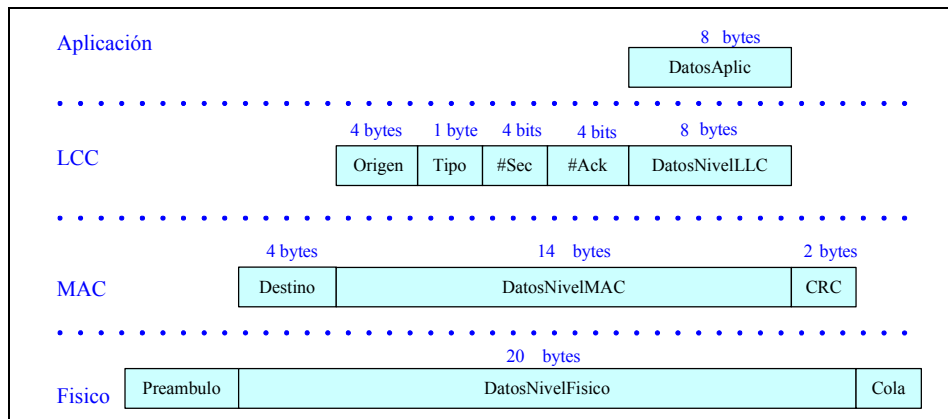


Fig. 2. Formato de los paquetes de la pila de protocolo.

2.1 Capa física

Como ya se ha comentado, el protocolo se ha definido para que pueda funcionar en principio con diferentes módulos de RF (transceivers), por lo tanto se ha definido una capa física independiente del transceiver a utilizar. Los transceivers utilizados se caracterizan por disponer de un interfaz similar, utilizando las señales de TX y RX para la transmisión y recepción de datos, TX_Enable y/o RX_Enable para activar el modo Emisión o Recepción y una señal de CD de detección de la portadora. A continuación se presenta la capa física utilizada con los módulos AUREL y nRF401 de Nordic (el módulo nRF2401 de Nordic, ya implementa una capa física on-chip).

La capa física es la encargada de enviar una trama MAC del emisor al receptor. Dado que estos transceivers utilizan la modulación en frecuencia FSK, obliga a introducir algún sistema de codificación en la trama de datos, que garantice transiciones periódicas en la señal. En la implementación actual se ha optado por la utilización de la codificación Manchester. En este tipo de codificación cada bit de la trama de datos se codifica con un par de bits (Fig.3).

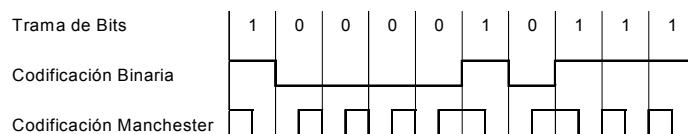


Fig. 3. Codificación Manchester.

El esquema de la capa física se presenta en la figura 4. El emisor consta de una cola donde se guarda la trama MAC a transferir, a la que le añade un preámbulo y una cola, posteriormente se realiza la codificación de la señal (Manchester en este caso) y se envía a la línea TX del transceiver. En la recepción la señal se pasa por un filtro para minimizar el ruido de la línea RX, el dato filtrado se decodifica (Manchester) y se almacena en la trama. Cuando dicha trama concuerda con la trama de un paquete (Preámbulo + Datos + Cola) se pasa a la

capa MAC para su validación. El preámbulo a utilizar va a depender del sistema de codificación que se utilice, con el objeto de identificar el paquete y también para conseguir la sincronización correcta de la trama.

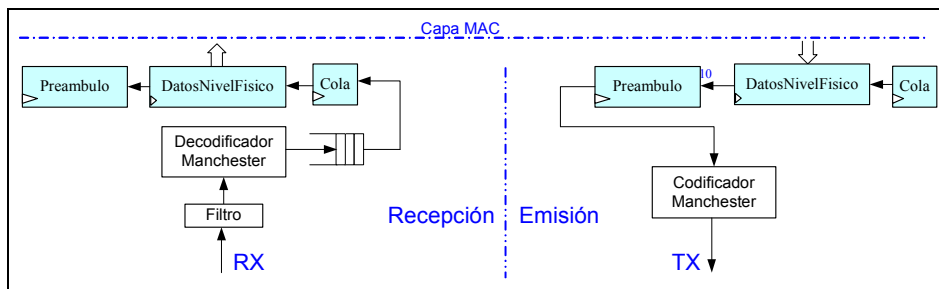


Fig. 4. Esquema funcional de la capa física.

Dado que la codificación Manchester reduce la velocidad de transmisión de datos (codifica en dos bits cada bit de datos), en la actualidad se están probando con otros métodos de codificación como la inserción de bits o el “data scrambling”, con el fin de conseguir una mayor eficiencia y mejorar el ancho de banda. Aunque conviene indicar que la codificación Manchester hace mejorar la sensibilidad del transceiver, mejorando los tiempos de respuesta del mismo.

2.2 Control de acceso al medio (MAC)

En un protocolo de comunicación de datos la capa siguiente a la capa física es el control de enlace de datos. Dentro de éste se suele añadir una subcapa de control de acceso al medio. Esta capa es la encargada de validar las tramas que se reciben, comprobando errores de transmisión y verificando el destinatario, es decir, si está o no dirigida al propio elemento que las recibe (maestro o esclavo). Para realizar el control de errores se ha utilizado el método de chequeo de redundancia cíclica CRC-CCIT de 16 bits con el generador polinomial $P(X)=X^{16}+X^{12}+X^5+1$. La validación de un paquete recibido consiste en comprobar su CRC y si su identificador de destino se corresponde con el identificador propio, en este caso el paquete recibido se da por válido y se pasa a la capa LLC superior. La emisión de un paquete consiste en añadir la dirección fuente, calcular el CRC del paquete y enviarlo a la capa física inferior (Fig. 5).

2.3 Nivel de Enlace (LLC)

El objetivo de esta capa es el envío de forma correcta de los datos del módulo fuente al destino, es decir, que el módulo receptor debe pasar un paquete de datos al nivel superior (de aplicación) sin errores, una sola vez y en el orden correcto, lo que permite establecer una comunicación sin errores.

Antes de comenzar a describir el modelo de comunicación del protocolo, comentar que para poder utilizar el protocolo en la gama más amplia posible de transceivers, se le ha impuesto

la limitación de disponer de una sola línea (canal) de comunicación, por lo tanto en un instante dado solo un elemento tiene acceso a la comunicación.

En un modelo de comunicación maestro-esclavo, el control de la comunicación está dirigida por el maestro, y es el que decide en todo momento quién tiene permiso para realizar la comunicación, evitando así las colisiones entre el maestro y los esclavos.

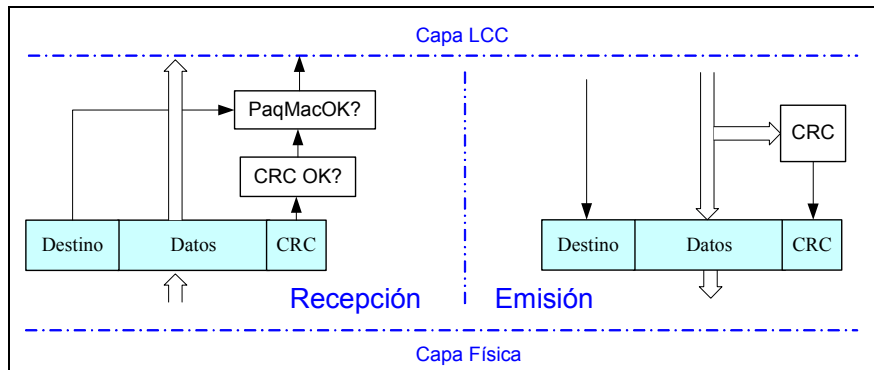


Fig. 5. Esquema funcional de la capa MAC.

El protocolo desarrollado utiliza una estrategia de retransmisión stop and wait, en esta estrategia, cada vez que se envía un paquete con datos, el emisor no envía el siguiente paquete con datos hasta que se reciba una respuesta (ACK) que le indique que la recepción ha sido correcta. En caso de que no se reciba nada (time-out) o que la recepción no haya sido correcta, se envía de nuevo el paquete.

En la implementación, el maestro dispone de una lista de esclavos con los que puede comunicarse. Esta lista se le proporciona mediante un interfaz con la capa superior de aplicación. Para realizar la comunicación, el maestro encuesta a cada uno de los esclavos, por turno circular, enviando un paquete a un esclavo, proporcionándole de esta manera un turno de comunicación. El esclavo pasa a disponer de la línea y le contestará con uno o varios paquetes en función de los datos que necesite transmitir. En el caso de que el maestro necesite transmitir datos a un esclavo, la transmisión se realizará en el momento de enviar el turno, adjuntando los datos. En la figura 6 se puede ver el autómata del módulo maestro y en la figura 7 el esquema de los bloques del mismo. Consta de una lista de los esclavos que van a intervenir en la comunicación con la información de control necesaria para cada uno, de una cola de recepción que almacenará los paquetes recibidos y otra pseudo-cola con los datos para transmitir para cada esclavo.

Otra de las características añadidas ha sido el control del tiempo de ocupación de la línea. Debido a que las normativas europeas sobre el uso de los sistemas de radiofrecuencia [7][8][9] imponen unos tiempos máximos de ocupación de los canales, se ha añadido un control de tiempo de ocupación. Si la línea lleva ocupada un cierto tiempo, el maestro pasa a un estado de no transmisión hasta que transcurra el tiempo indicado por la normativa correspondiente. En la implementación, estos tiempos están parametrizados con lo cual su adaptación a la norma correspondiente es muy simple.

Debido a que se trata de un modelo de comunicación dirigido por el maestro, el algoritmo del módulo esclavo se simplifica notablemente. Se reduce a una espera de un turno y pasa a

contestar, además debe controlar todo lo relativo a los reenvíos de los paquetes (Stop and Wait o ventana deslizante). En la figura 8 se ve el autómata del módulo esclavo.

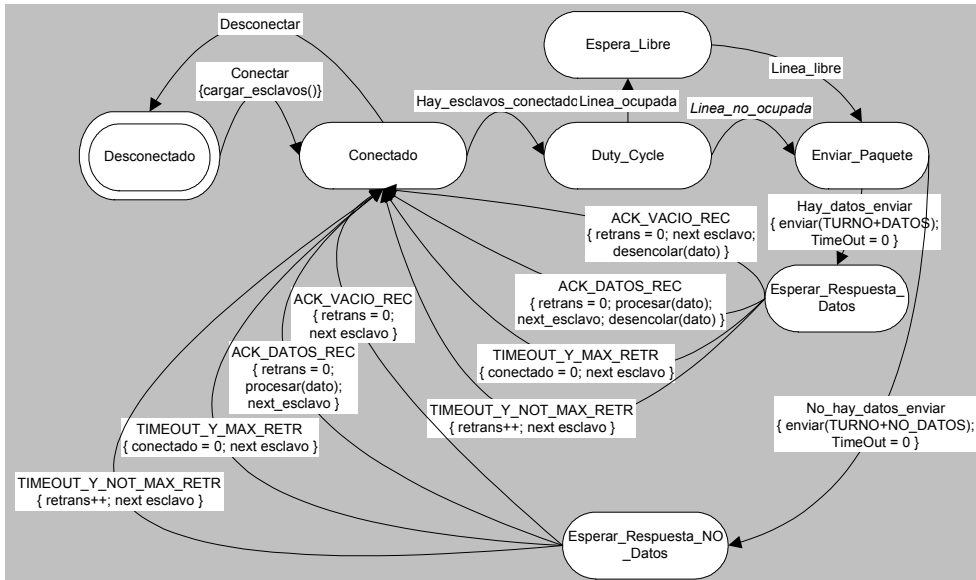


Fig. 6. Autómata del nivel LLC del maestro

Para evitar la pérdida de tiempo en intentos de comunicación con esclavos que no estén accesibles, bien porque están desconectados, bien porque su lejanía al maestro impidan su comunicación, se ha añadido una función de desconexión de un esclavo. Si tras varios intentos sucesivos de comunicación del maestro con un esclavo no hay respuesta, se desconecta a dicho esclavo.

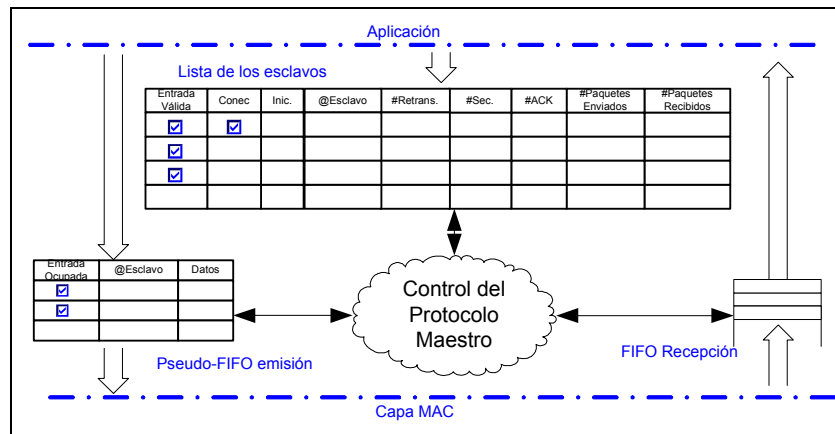


Fig. 7. Estructura del módulo maestro.

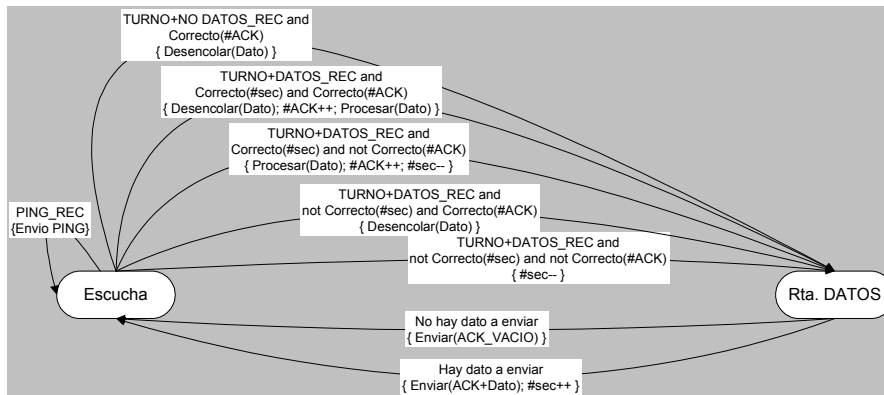


Fig. 8. Autómata del nivel LLC del esclavo

3 Implementación y resultados.

El desarrollo de los módulos maestro y esclavo se han realizado con el lenguaje de descripción hardware VHDL sobre plataformas de prototipado rápido basadas en lógica reconfigurable. Inicialmente con placas de evaluación de Altera (APEXpert) y posteriormente con placas diseñadas por el grupo basadas en dispositivos de lógica reconfigurable de Altera APEX 20KE, Cyclone C3 y C6. Las plataformas de desarrollo utilizadas han sido Quartus II para simulación y síntesis, ModelSim como simulación y SignalTap como herramienta de validación, test. En la tabla 1 se pueden ver los resúmenes de la ocupación de celdas lógicas, registros y memoria para los módulos maestro y esclavo.

	nrf 401						nrf 2401					
	Maestro			Esclavo			Maestro			Esclavo		
	Logic Cells	Regs.	Memory Bits	Logic Cells	Regs.	Memory Bits	Logic Cells	Regs.	Memory Bits	Logic Cells	Regs.	Memory Bits
Protocolo	2510	1324	5920	980	453	4352	2128	1225	5664	662	373	4096
Nivel LLC	1800	993	5664	270	122	4096	1674	959	5664	650	371	4096
Nivel MAC	286	59	0	286	59	0	---	---	---	---	---	---
Nivel Físico	424	272	256	424	272	256	---	---	---	---	---	---
Contr. RF	---	---	---	---	---	---	454	266	0	438	265	0

Tabla. 1. Ocupación hardware

Si bien la mayoría de los fabricantes de transceivers proporcionan la velocidad máxima a la que los transceivers pueden emitir datos, en una aplicación práctica esos datos suelen variar ya que parámetros como el ruido del entorno, la distancia a transmitir o el tamaño de los datos a transferir afectan la cantidad real de datos a poder transmitir. Aparece entonces una necesidad de estimar cual es la velocidad de transmisión, distancia óptima y tamaño de los paquetes en función del módulo concreto de RF. Para realizar esta estimación se ha preparado un banco de pruebas del sistema para cada módulo de RF. Este banco consiste en una serie de test realizados con la ayuda de la herramienta de SignalTap, en los que se calcula el porcentaje de paquetes que llegan correctos en una transmisión. Se realiza la transmisión de 1000 paquetes desde el módulo maestro al esclavo y los mismos de respuesta desde el mó-

dulo esclavo al maestro. En la figura 9 se puede observar algunos de los resultados obtenidos en el test.

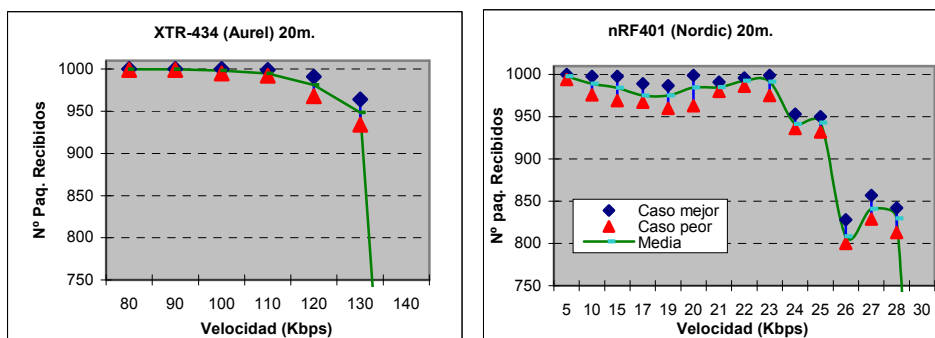


Fig. 9. Resultados del test para los módulos XTR-434 y nRF401 a una distancia de 20m.

Se han realizado varias implementaciones del sistema con los transceivers de XTR-434, RTX-RTL434 y RTF-Data-SAW de AUREL y los módulos nRF401 y nRF2401 de Nordic, en la figura 10 aparecen algunos ejemplos de las mismas. Estos prototipos se han utilizado en diferentes entornos de aplicación como el control de pruebas deportivas, la gestión de residuos y la lectura remota de contadores.

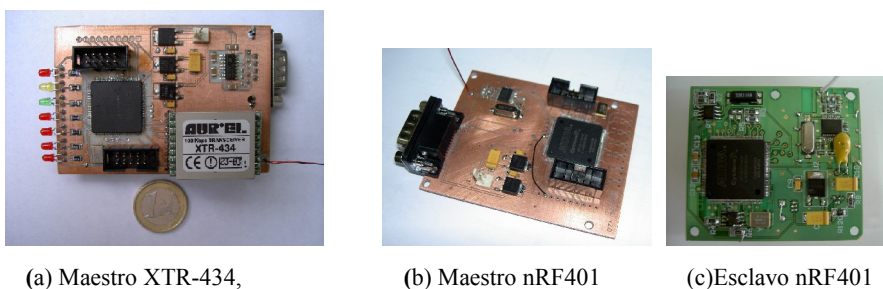


Fig. 10. Imágenes de algunos prototipos.

Agradecimientos

Este sistema se ha podido desarrollar gracias al proyecto Kioltek <http://www.kioltek.com> subvencionado por el Gobierno vasco y gestionado por la asociación GAIA, a la empresa KIFER Servicios Informáticos, a los proyectos k-SPEED y Telecontadores subvencionados por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (FIT-070000-2002-61, FIT-070000-2003-426, FIT-070000-2003-968) y la UPV/EHU (UE02/C04).

Referencias

1. Tanenbaum A.S.: Redes de Ordenadores. Cuarta Edición Pearson Prentice Hall México (2003).
2. Nordic Semiconductor ASA. nRF2401 Single Chip 2.4 GHz Radio Transceiver. http://www.nvlsi.no/files/Product/data_sheet/nRF2401rev1_1.pdf
3. Nordic Semiconductor ASA. nRF401 Single Chip RF Transceiver. http://www.nvlsi.no/files/Product/data_sheet/datasheetnRF401rev1_6.pdf
4. Aurel S.P.A. RTF-DATA-SAW Application Note. <http://www.aurel.it> (1995)
5. Texas Instruments TRF5901 SINGLE-CHIP RF . <http://www.ti.com/> (2002)
6. Toshiba. TA32305FN/TA32305FNG RF 1chip Receiver and Transmitter for low power wireless <http://www.toshiba.com/taec/> (2003)
7. ELETRONIC COMMUNICATIONS COMMITTEE,. ECC Decisión of 19 March 2004 on harmonised frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Non-specific Short Range Devices operating in the frequency band 433.050-434.790 MHz excluding audio and voice applications 8.- ECC/DEC/(04)02 <http://www.ero.dk/>
8. EUROPEAN RADIOCOMMUNICATIONS COMMITTEE, ERC Decisión of 12 March 2001 on harmonised frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Non-specific Short Range Devices operating in the frequency band 2400 - 2483.5 MHz (ERC/DEC/(01)05)ECC/DEC/(04)02 European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) <http://www.ero.dk/>
9. EUROPEAN RADIOCOMMUNICATIONS COMMITTEE, ERC Decisión of 12 March 2001 on harmonised frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Non-specific Short Range Devices operating in the frequency band 868.0 - 868.6 MHz 868.7 - 869.2 MHz 869.4 - 869.65 MHz 869.7 - 870.0 MHz (ERC/DEC/(01)04) European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) <http://www.ero.dk/>