



FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

---

TESIS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

# Diseño de un Circuito Integrado CMOS para Identificación por Radiofrecuencia basado en el Estándar ISO-14443

---

Tesista

Fabrizio P. Alcalde Bessia

Padrón Nº86296

f@lcald.com.ar

Director

Dr. Ing. José Lipovetzky

jlipove@fi.uba.ar

Co-Director

Ing. Octavio Alpago

oalpago@fi.uba.ar

AGOSTO, 2014



## Agradecimientos

*Agradezco a José por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, que surgió de un interés personal.*

*También agradezco Diego M. por haber puesto en marcha el servidor con las herramientas que cómodamente pude usar desde mi casa y por haberme ayudado desde su experiencia con el trabajo.*

*Debo agradecer también a Allegro Microsystems, en especial a Patricio P. Preiti y Julio Raiponeri, por haberme dejado utilizar los elementos del laboratorio. También a MOSIS, Mentor Graphics y Synopsys, por sus respectivos programas estudiantiles que hicieron posible la realización de este trabajo.*

*Finalmente agradezco a mis compañeros y amigos que me ayudaron e hicieron más amenos todos estos años de estudio y sobretodo agradezco a mi familia por haber hecho de soporte todo este tiempo.*



## Resumen

En el presente trabajo se comenzará realizando una breve introducción a los sistemas de identificación por radiofrecuencia. Luego se analizará detalladamente el estándar ISO/IEC 14443, enfocando el estudio a la interfaz de comunicación tipo A. A continuación se presentará el diseño de un circuito integrado que cumplirá el rol de *transponder* y que será implementado en un proceso CMOS estándar de 0,5  $\mu\text{m}$ .

Para el diseño del circuito integrado se comenzará por analizar en profundidad el vínculo existente entre lector y transponder, lo que permitirá entender el proceso de traspaso de energía e información y se verán las distintas implementaciones posibles. Luego se desarrollará un modelo basado en la extracción de parámetros de la estructura física de las antenas, que permitirá verificar los resultados analíticos y realizar simulaciones mediante SPICE de los circuitos, estando éstos conectados a un modelo realista de la antena.

El circuito integrado contará con diseño analógico y digital, este último sintetizado a partir de código RTL. Se tratará entonces de un dispositivo de señal mixta por lo que se deberán compatibilizar ambos dominios. Se mostrará el diseño digital junto con su verificación funcional a nivel de compuerta y el diseño analógico con las simulaciones realizadas.

Finalmente se cerrará el trabajo con los detalles de la implementación del dispositivo en el proceso de fabricación CMOS y la verificación de su funcionamiento.



# Índice general

<b>1. Introducción a RFID</b>	<b>1</b>
1.1. Identificación por radiofrecuencia . . . . .	1
1.2. Clasificación de los sistemas de RFID . . . . .	2
1.3. Estandarización de los sistemas de RFID . . . . .	4
1.3.1. ISO/IEC 14443 – Parte 1: Características físicas . . . . .	5
1.3.2. ISO/IEC 14443 – Parte 2: Interfaz de radiofrecuencia para señal y energía . . . . .	5
1.3.3. ISO/IEC 14443 – Parte 3: Inicialización y anticolisión	10
1.4. Resumen del capítulo . . . . .	15
<b>2. Diseño del transponder de RFID</b>	<b>17</b>
2.1. Objetivos del diseño . . . . .	17
2.2. Descripción general del funcionamiento . . . . .	18
2.3. Implementación . . . . .	20
<b>3. Acoplamiento Inductivo</b>	<b>23</b>
3.1. Transmisión de la energía . . . . .	23
3.2. Transmisión por modulación de carga . . . . .	29
3.3. Modelo de SPICE del arreglo de antenas . . . . .	32
3.4. Resultados del análisis . . . . .	33
<b>4. Diseño digital</b>	<b>35</b>
4.1. Arquitectura . . . . .	36
4.2. Recepción de datos . . . . .	37
4.2.1. Módulo Bit Decoder . . . . .	38
4.2.2. Módulo Frame Receiver . . . . .	40
4.3. Transmisión de Datos . . . . .	42
4.3.1. Módulo Frame Sender . . . . .	44
4.3.2. Módulo Bit Coder . . . . .	46
4.4. Verificación funcional . . . . .	47
4.4.1. Eco de un byte . . . . .	48
4.5. Implementación: Síntesis y <i>Place&amp;Route</i> . . . . .	49

<b>5. Diseño Analógico</b>	<b>53</b>
5.1. Acondicionamiento y uso de la energía . . . . .	53
5.1.1. Regulador/Limitador de tensión . . . . .	54
5.1.2. Rectificador + Filtro . . . . .	60
5.2. Transmisión y recepción de datos . . . . .	63
5.2.1. Detector de Pausas . . . . .	63
5.2.2. Modulador . . . . .	66
5.3. Generador de reloj . . . . .	67
5.4. <i>Power-On Reset</i> (POR) . . . . .	69
<b>6. Implementación, Evaluación y Resultados</b>	<b>73</b>
6.1. <i>Layout</i> Completo del Circuito Integrado . . . . .	73
6.2. Método de Verificación . . . . .	76
6.3. Resultados . . . . .	78
6.3.1. Recepción de datos . . . . .	79
6.3.2. Transmisión de Datos . . . . .	82
6.3.3. Regulador/Limitador de tensión . . . . .	83
6.3.4. Verificación del funcionamiento completo . . . . .	84
<b>7. Conclusiones</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>91</b>



# Capítulo 1

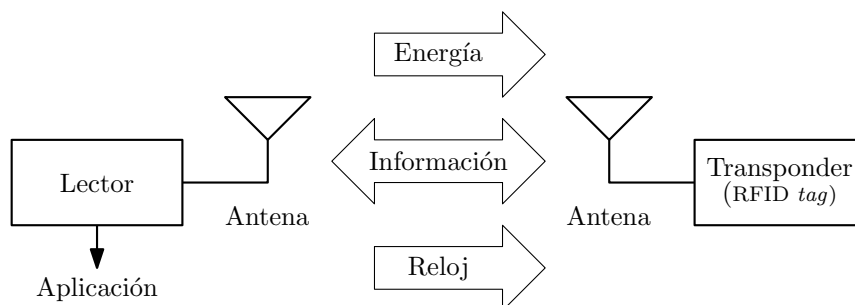
## Introducción a RFID

### 1.1. Identificación por radiofrecuencia

En los años recientes los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID por sus siglas en inglés) se han vuelto muy populares en áreas como logística, control de acceso, industria manufacturera e incluso transporte. Esto es debido a que brindan información segura, actualizada y permiten llevar un control eficiente del estado de los productos a un muy bajo costo de mantenimiento.

Este tipo de sistemas forma parte de los que se conocen como sistemas de *identificación automática* (Auto-ID), donde tal vez el de uso más extendido sea el código de barras. El RFID nace como una evolución natural dedicada a identificar o realizar el seguimiento de personas o productos, y que supera al código de barras en cuanto a cantidad de datos almacenables, no requiere línea de visión directa y permite la lectura simultánea de múltiples artículos. Se trata de un sistema que está directamente relacionado con las clásicas *tarjetas inteligentes*, que eran dispositivos de almacenamiento electrónico de datos, con posibilidad de algún procesamiento que, por conveniencia, tenían el tamaño de una tarjeta de crédito. Sin embargo, en los sistemas de RFID la alimentación del dispositivo portador de información y la transmisión de datos no se realiza utilizando contacto galvánico sino que se realiza utilizando campos magnéticos o electromagnéticos y por lo tanto se evitan los problemas de desgaste y el consecuente mantenimiento asociado. Se trata entonces de un sistema de identificación inalámbrica rápido y robusto.

Un sistema de identificación por radiofrecuencia está formado por un *interrogador* o *lector* y uno o varios *transponders*, que generalmente toman la forma de tarjetas personales y/o etiquetas autoadhesivas (RFID *tags*). Cada transponder cumple el rol de portador de información tal como un número de identificación, datos de un producto o saldo restante si se trata de un pasaje electrónico. Debido a su reducido tamaño y peso son dispositivos ideales para ser transportados por personas y animales, o para ser adheridos



**Figura 1.1:** Esquema típico de un sistema de identificación por radio frecuencia. Lector y transponder son los componentes principales.

a envases. Normalmente están formados por un dispositivo de acoplamiento, que permite realizar el vínculo con el lector a través de campos magnéticos o electromagnéticos, y un circuito integrado que se encarga de almacenar y procesar la información e implementa un protocolo de comunicación para transmitir esa información sin pérdida de datos. Es al diseño del circuito integrado que estará dedicado gran parte del presente trabajo de tesis.

La comunicación con el transponder se realiza a través de campos magnéticos o electromagnéticos que, dependiendo de la tecnología utilizada, se encuentran en las bandas de LF (Low Frequency), HF (High Frequency) o UHF (Ultra High Frequency). El lector cuenta con una antena con la que mantiene el campo dentro de su área de influencia. Cuando un transponder ingresa dentro del campo generado por el lector, por un lado se transmite energía desde el lector hacia el transponder, que en el caso de un tag pasivo será utilizada para alimentar los circuitos internos; y por otro se produce un vínculo entre el lector y el transponder que puede ser utilizado para transmitir información. En general la información se envía realizando algún tipo de modulación sobre el campo. Al ser el lector la fuente del campo electromagnético, es muy común interrogar al transponder modulando la amplitud y/o fase, mientras que para transmitir información en sentido inverso, desde el transponder hacia el lector, se utiliza modulación de carga o variaciones en el coeficiente de reflexión.

## 1.2. Clasificación de los sistemas de RFID

Existen numerosos sistemas de identificación por radio frecuencia, casi tantos como fabricantes, por lo que se debe realizar algún tipo de clasificación que permita entender el alcance del presente trabajo. Además, tener una clasificación permite reducir esa gran variedad a algunas pocas categorías con las que se pueden reconocer las características principales de cada sistema. Por ejemplo, algunas características que pueden interesarnos son: la *distancia de operación* que está relacionada con parámetros como frecuencia y potencia;

la longitud de *penetración* de las ondas, para saber si el dispositivo puede ser interrogado dentro de la piel o debajo del agua y que también está relacionada con la frecuencia; velocidad de transmisión de datos, etc...

La frecuencia de operación se encuentra en un amplio rango del espectro electromagnético ya que existen sistemas que operan desde onda larga a 135 kHz hasta microondas a 5,8 GHz. El acoplamiento físico se realiza utilizando campos *eléctricos*, *magnéticos* o *electromagnéticos* y el alcance típico de los sistemas varía de algunos milímetros a decenas de metros.

Los transponders pueden ser activos o pasivos, según la forma en la que obtienen la energía. Se dice que un transponder es *activo* cuando cuenta con energía propia (se alimenta a través de pilas o baterías), lo que generalmente se utiliza para lograr un alcance mayor. Por otra parte se les dice *pasivos* a aquellos que no cuentan con energía propia y por lo tanto dependen de la energía proporcionada por el lector para funcionar. Estos últimos son los más difundidos en el mercado ya que al no contar con baterías su costo se reduce drásticamente respecto de los activos.

Los sistemas de RFID de muy corto alcance, menos de 1 cm, se conocen como «*sistemas de acoplamiento cercano*» (*close-coupling systems*). La lectura del transponder se realiza insertándolo en el lector o bien posicionándolo sobre una superficie dispuesta para tal fin. Los sistemas de acoplamiento cercano utilizan campos eléctricos o magnéticos y teóricamente pueden funcionar desde cero hasta 30 MHz, ya que no dependen del fenómeno de radiación. El gran acople existente en este tipo de sistemas facilita la transmisión de energía y por lo tanto pueden utilizarse grandes cargas e incluso microprocesadores con consumos de potencia no optimizados. Estos sistemas se utilizan principalmente en aplicaciones donde se requiere una estricta seguridad y que a su vez no es necesario un largo alcance, como por ejemplo cerraduras electrónicas o sistemas electrónicos de pago.

Los sistemas con un alcance de hasta 1 m se conocen como «*sistemas de acoplamiento remoto*» (*remote coupling systems*). Casi todos estos sistemas están basados en *acoplamiento inductivo*, es decir, utilizan campos magnéticos para establecer el enlace entre el lector y el transponder. El acoplamiento inductivo se utiliza hoy en día en por lo menos el 90 % del mercado de RFID y es por ese motivo que se le prestará especial importancia a lo largo del informe. Trabajan a frecuencias de 135 kHz, 13,56 MHz y en algunas aplicaciones especiales a 27,125 MHz.

Los sistemas de RFID con un alcance mayor a 1 m se conocen como «*sistemas de largo alcance*» (*long-range systems*). Todos los sistemas de largo alcance utilizan ondas electromagnéticas en las bandas de UHF y microondas, con frecuencias desde 868 MHz hasta 5,8 GHz. Los transponders trabajan de un modo parecido a un radar produciendo la reflexión de las ondas emitidas por el lector para comunicarse. Utilizando tags pasivos es común lograr un alcance de aproximadamente 3 m, mientras que con tags activos es posible alcanzar los 15 m o más. Sin embargo, la energía proveniente de la batería

en los tags activos no se utiliza para realizar la transmisión de datos, sino que es utilizada solo para alimentar los circuitos internos de procesamiento y retención de datos. La única energía utilizada para transmitir información es la proveniente del mismo lector a través del campo electromagnético.

### 1.3. Estandarización de los sistemas de RFID

La estandarización es un tema crítico en los sistemas de identificación, ya que permite la interoperabilidad entre distintas empresas y sectores. Un sistema estándar puede ser utilizado por toda la cadena de suministro de un producto y de esta forma se pueden identificar los ítems que la transitan de manera unívoca.

A través de los años se han definido numerosos documentos, como por ejemplo: ISO 11784/5 para la identificación de animales, ISO/IEC 14443 para tarjetas de identificación por proximidad (Proximity cards), ISO/IEC 15961/2 para la administración de productos, ISO/IEC 15693 para tarjetas de identificación por cercanía (Vicinity cards), ISO/IEC 18000 para el seguimiento de productos, etc. Dentro de las normas mencionadas, la ISO/IEC 14443 a tomado especial relevancia debido a que numerosos medios de pago electrónico se basan en ella para acceder al medio y luego trabajan con protocolos propietarios de nivel superior, como es el caso de las tarjetas MiFare de NXP.

El estándar ISO/IEC 14443 está dividido en cuatro partes en las que se definen las características físicas de las tarjetas en cuanto a tamaño y forma; frecuencia de operación, símbolos y características de señal (la capa física del protocolo); luego se definen tamaños y características de las tramas, un método para evitar colisiones y que permite seleccionar uno de entre varios transponders dentro del alcance del lector; y por último define un protocolo de alto nivel, de carácter opcional, para transmitir información e intercambiar mensajes de control y de estado.

En el estándar ISO/IEC 14443 se trabaja con campos magnéticos variables en la banda libre para uso industrial, médico y científico (ISM) a una frecuencia de 13,56MHz (HF), y el transponder utiliza un inductor de tamaño no mayor al de una tarjeta ID-1 [12] para establecer el enlace con el lector. Se trata de un acoplamiento inductivo débil ya que el campo magnético se encuentra disperso en el espacio, al contrario de lo que ocurre en un transformador.

A continuación se realizará una breve reseña del contenido de cada parte de la norma. Las partes 2 y 3 contienen la información acerca de las señales, símbolos y codificaciones utilizadas en el sistema y por lo tanto se les prestará especial atención. La parte 4 se dejará de lado ya que, además de ser opcional, define un protocolo de alto nivel con paquetes de datos que no será implementado.

Intensidad de campo magnético [A/m] <sub>rms</sub>	
$H_{\text{mín}}$	$H_{\text{máx}}$
1,5	7,5

**Tabla 1.1:** Límites para la intensidad del campo magnético dentro de los cuales deben operar las PICC, y que no deben ser superados por el PCD.

### 1.3.1. ISO/IEC 14443 – Parte 1: Características físicas

En la primera parte del documento se realizan dos definiciones importantes que serán utilizadas luego a lo largo de toda la norma.

- Se define al transponder, el dispositivo portador de la información, como PICC: «*Proximity Integrated Circuit Card*»
- Se define al lector, que es el dispositivo que produce el campo magnético y se comunica con el transponder a través de acoplamiento inductivo, como PCD: «*Proximity Coupling Device*»

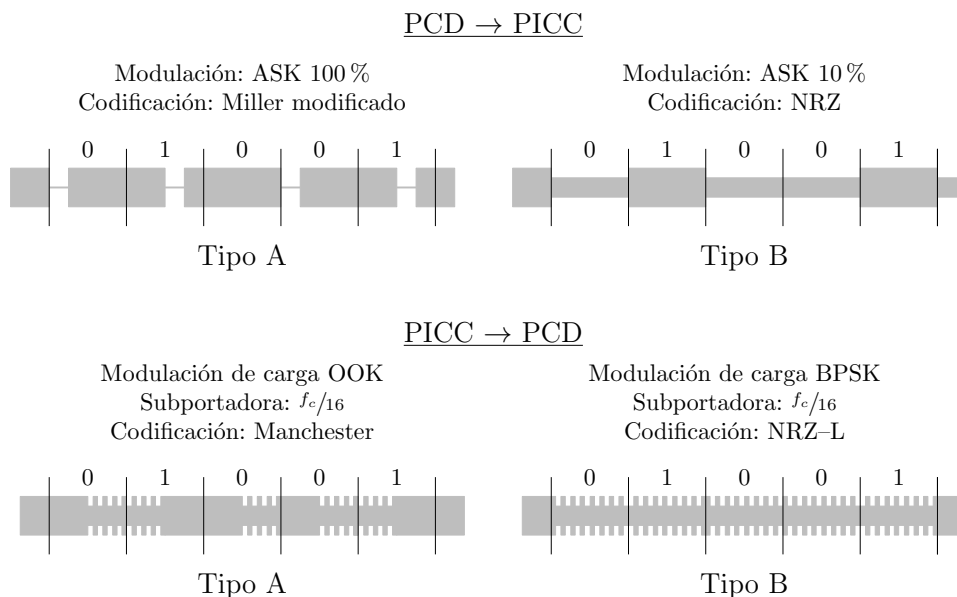
También se definen las características físicas del transponder en cuanto a tamaño y forma. Se limita el tamaño de la antena a  $(86 \times 54 \times 3)$  mm ya que la interfaz de radiofrecuencia y los bancos de prueba, que están definidos en la norma ISO/IEC 10373-6 [11], son para una antena del tamaño de una tarjeta tipo ID-1. El estándar ISO/IEC 7810 define el tamaño de este tipo de tarjetas.

Además se incluye información acerca de la radiación ultravioleta, rayos X, campos eléctricos y magnéticos, y temperaturas máximas que deben soportar las tarjetas.

### 1.3.2. ISO/IEC 14443 – Parte 2: Interfaz de radiofrecuencia para señal y energía

En esta segunda parte se describe el método utilizado para transferir la energía desde el PCD (lector) hacia la PICC (tarjeta). El PCD debe generar un campo magnético alterno a una frecuencia de  $13,56 \text{ MHz} \pm 7 \text{ kHz}$  y las PICC deben acoplar inductivamente ese campo para recibir energía, y modularlo para transmitir información. La frecuencia de trabajo del sistema se define como  $f_c = 13,56 \text{ MHz}$ . Prácticamente todos los parámetros se definen luego en función de  $f_c$ , por lo que se convierte en un valor extremadamente importante para el diseño.

Luego se definen los valores máximos y mínimos de campo magnético que el PCD debe ser capaz producir dentro de su volumen de operación, y con los que las PICC deben funcionar correctamente. Los valores pueden verse en la tabla 1.1.



**Figura 1.2:** Ejemplos de transmisión desde el PCD hacia la PICC y viceversa, para las interfaces tipo A y B a una tasa de  $f_c/128$  bits por segundo ( $\sim 106$  kbit/s).

La comunicación con el transponder se realiza siguiendo una lógica *maestro-esclavo*, donde el PCD tiene el rol de dispositivo maestro y es el encargado de encuestar periódicamente a los transponders; mientras que las PICC hacen de dispositivos esclavos, esperando en silencio a recibir un comando para transmitir sólo su respuesta.

La transmisión de información desde el PCD hacia la PICC se realiza a través de la modulación de amplitud del campo magnético, mientras que la transmisión en sentido inverso, desde la PICC hacia el PCD, se realiza conectando y desconectando una carga que toma energía del campo magnético (Modulación de carga). La conexión y desconexión se realizan al ritmo de una subportadora que se encuentra modulada por la información transmitida.

Se definen dos interfaces de comunicación: Tipo A y Tipo B. Cada interfaz define su propio protocolo, que cuenta con una serie de símbolos y comandos. El PCD debe ser compatible con ambas interfaces y debe alternar entre ellas mientras se encuentra en reposo, antes de detectar la presencia de una tarjeta. Las PICC implementan solo una de las interfaces, ya sea tipo A o tipo B. Una vez establecida la comunicación se utiliza la interfaz correspondiente a ese transponder hasta su finalización. En la figura 1.2 se muestran ejemplos de comunicación con cada una de las interfaces.

La tasa de transmisión de bits «*bit rate*» se definió inicialmente como  $f_c/128$  bit/s, lo que equivale a aproximadamente 106 kbit/s. Sin embargo a medida que pasaron los años y se fue mejorando la tecnología también se fueron agregando al estándar velocidades cada vez más altas con carácter

opcional y que se negocian entre los dispositivos al momento de establecer el enlace. Así, además de  $f_c/128$  bit/s se tiene  $f_c/64$ ,  $f_c/32$  y  $f_c/16$  bit/s. La tasa de transmisión original es obligatoria para cumplir con el estándar y se utiliza durante las etapas de inicialización y anticolidión.

El circuito integrado a diseñar será compatible con la interfaz tipo A a una tasa de  $f_c/128$  bit/s debido a que históricamente gran parte del mercado de RFID se decidió por esa interfaz y velocidad. Entonces, para no extender demasiado la descripción del estándar y evitar la confusión entre interfaces, a continuación se mencionarán solo las secciones de la norma relacionadas con la interfaz tipo A a la tasa de transmisión original de la norma.

El envío de información desde el PCD hacia la PICC según la interfaz tipo A a  $f_c/128$  bit/s se realiza modulando la amplitud del campo magnético con un índice de modulación del 100 % (*Amplitude-shift Keying 100 %*), lo que produce que la señal de RF se extinga durante cierto tiempo. A esa pausa que se produce en el campo magnético se la llama «PauseA». La norma define los tiempos de crecimiento y decrecimiento de la señal de RF, la amplitud máxima en la zona de 100 % de modulación y el sobre pico máximo que puede existir al retornar la señal a su nivel de operación [17, pág. 7]. La duración de la pausa se define dando valores máximos y mínimos dentro de los cuales deben operar los dispositivos para cumplir la norma. El valor típico de duración puede tomarse como  $32/f_c$  segundos ( $\sim 2,36 \mu\text{s}$ ).

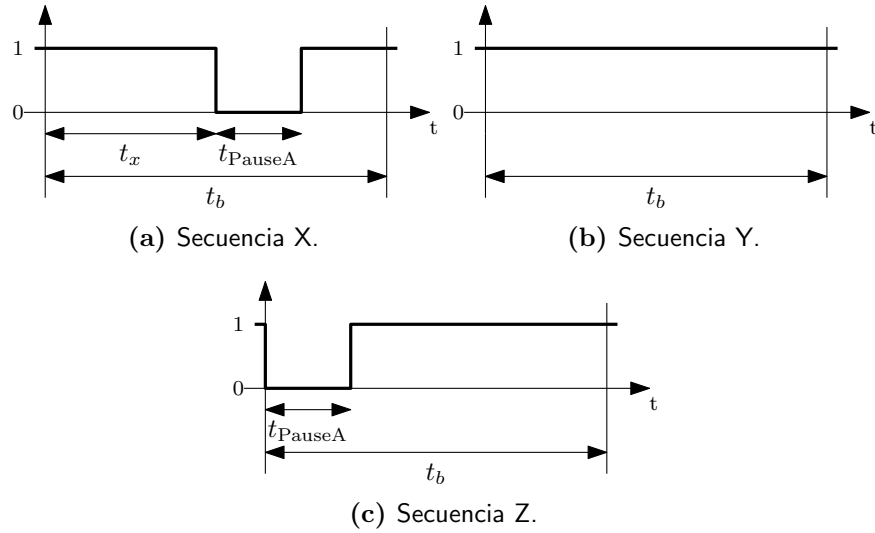
Para la codificación de la información transmitida desde el PCD hacia la PICC se definen tres tipos de secuencias [17, pág. 14]:

- Secuencia X: Se envía una *PauseA* luego de un tiempo ( $t_x$ ) igual a la mitad de la duración de un bit.
- Secuencia Y: No se modula la señal durante el tiempo total del bit ( $t_b$ )
- Secuencia Z: Se envía una *PauseA* al comienzo del tiempo del bit.

Operando a  $f_c/128$  bit/s el tiempo de duración del bit  $t_b$  queda definido como  $128/f_c$  segundos ( $\sim 9,44 \mu\text{s}$ ), mientras que la mitad de duración  $t_x$  es  $64/f_c$ . En la figura 1.3 puede verse una ilustración de las secuencias X, Y y Z.

Con las secuencias anteriores el estándar define los símbolos utilizados en la comunicación, que pueden verse en la tabla 1.2. Cada símbolo se encuentra definido según el orden temporal de las secuencias X, Y y Z. Por ejemplo, cuando el PCD envía un cero lógico debe saber si la secuencia anterior fue Y, en cuyo caso enviará Z, o, si fue X, deberá enviar Y. Por lo tanto el lector debe contar con cierta memoria a la hora de codificar los símbolos. Lo mismo ocurre en la PICC cuando debe decodificar la trama recibida.

Como se mencionó antes, las PICC se comunican con el PCD a través del acople inductivo, cargando la señal portadora de frecuencia  $f_c = 13,56 \text{ MHz}$

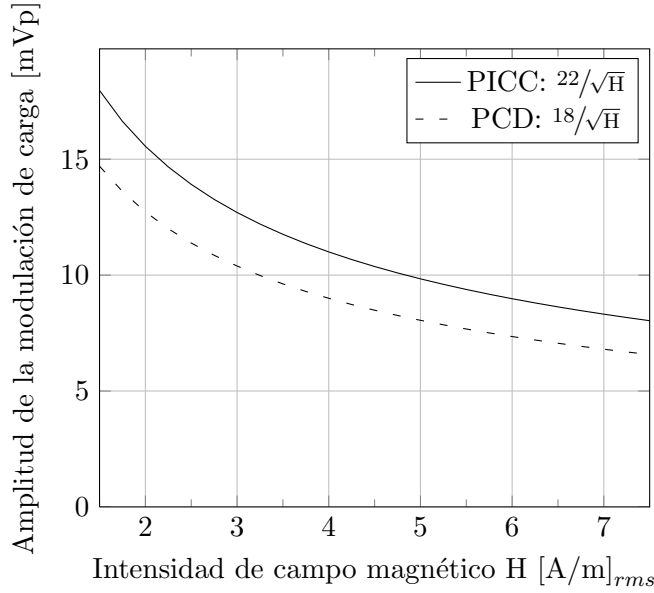


**Figura 1.3:** Ilustración de las secuencias definidas por el estándar para la transmisión de información desde el PCD hacia la PICC. El estado «1» corresponde a la señal estable (sin modular) y el estado «0» a la señal modulada.  $t_x = 64/f_c$ ,  $t_{\text{PauseA}} = 32/f_c$  y  $t_b = 128/f_c$ .

Símbolo	Secuencia previa	Representación
«1»		Secuencia X
«0»	Secuencia X	Secuencia Y
	Secuencia Y	Secuencia Z
	Secuencia Z	Secuencia Z
«Inicio»		Secuencia Z
«Fin»		«0» lógico seguido de una secuencia Y
«Silencio»		Al menos dos secuencias Y consecutivas

**Tabla 1.2:** Definición de los símbolos utilizados en la comunicación desde el lector hacia el transponder.





**Figura 1.4:** Amplitud mínima que debe ser producida por el transponder, y que el lector debe ser capaz de reconocer, ambas medidas según ISO/IEC 10373–6.

con una subportadora de frecuencia  $f_s = f_c/16$ , lo que equivale a aproximadamente 848 kHz, que a su vez es modulada por los datos a transmitir. El estándar especifica que la subportadora debe generarse conmutando una carga dentro del transponder.

La norma fija un valor mínimo de  $22/\sqrt{H}$  [mVp] para la amplitud producida por la modulación de carga de la PICC, donde H es el valor eficaz de la intensidad del campo magnético en [A/m]. También especifica un valor similar de amplitud que el PCD debe ser capaz de detectar. Sin embargo, como se trata de valores que dependen de aspectos constructivos del sistema, como pueden ser el tamaño de las antenas, sus inductancias, la posición del transponder respecto del lector, etc... también define el banco de medición y el método que debe utilizarse para determinar esas amplitudes experimentalmente. Las especificaciones del banco de medición se realizan en el documento ISO/IEC 10373–6. Allí se explica como deben fabricarse las antenas y se detalla el arreglo que debe construirse para medir la amplitud de la modulación de carga. Todos estos aspectos se verán más adelante en el análisis de la interfaz de comunicaciones.

La información es transmitida desde la PICC hacia el lector modulando el campo con una subportadora de frecuencia  $f_s$ . Cuando el transponder no transmite información se dice que el campo magnético se encuentra en su estado estable o «descargado». La norma especifica que cada bit debe comenzar con el estado «cargado» del campo, estableciendo así una fase definida para la subportadora. A continuación se detallan tres secuencias

Símbolo	Representación
«1»	Secuencia D
«0»	Secuencia E
«Inicio»	Secuencia D
«Fin»	Secuencia F
«Silencio»	Sin subportadora

**Tabla 1.3:** Definición de los símbolos utilizados en la comunicación desde el transponder hacia el lector.

utilizadas para la comunicación PICC  $\rightarrow$  PCD:

- Secuencia D: La señal de RF (portadora) se modula con la subportadora durante la primera mitad del tiempo de duración de un bit.
- Secuencia E: La portadora se modula con la subportadora durante la segunda mitad del tiempo de duración de un bit.
- Secuencia F: La portadora no se modula durante el tiempo de duración de un bit.

Hablando siempre de la velocidad de transmisión de  $f_c/128$  bit/s, el tiempo de duración de un bit es 128 períodos de la portadora y por lo tanto el tiempo de duración de medio bit es  $64/f_c$  ( $\sim 4,7 \mu\text{s}$ ). En la tabla 1.3 se definen los símbolos transmitidos por los transponders a partir de las secuencias D, E y F.

### 1.3.3. ISO/IEC 14443 – Parte 3: Inicialización y anticolisión

Cuando una tarjeta ingresa dentro del campo de un PCD se debe establecer una comunicación entre ambos que permita el traspaso de información, teniendo en cuenta que pueden existir otros transponders en el área y que incluso alguno de ellos puede estar transmitiendo datos. Esta parte del estándar describe las tramas del protocolo basándose en los símbolos definidos en la parte 2, y el procedimiento anticolisión utilizado para seleccionar una PICC en particular de las que se encuentran en alcance. Como las interfaces tipo A y B requieren tramas y procedimientos anticolisión diferentes, el documento fue dividido en dos grandes secciones que describen los métodos utilizados por cada esquema de modulación. Como se mencionó antes, se enfocará la descripción de la norma en la interfaz tipo A que es sobre la que se desarrolló este trabajo.

La comunicación entre el PCD y la PICC consta del envío de un comando por parte del lector y la transmisión de la respuesta por parte del transponder.

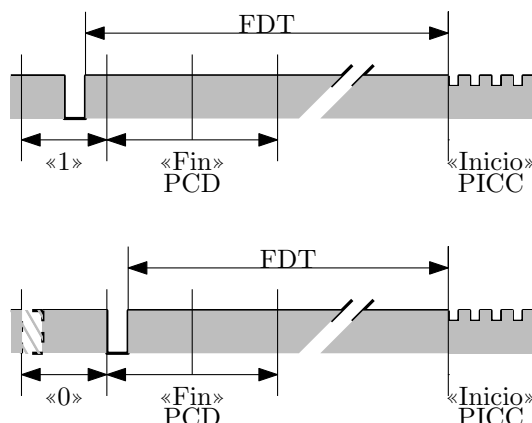
La comunicación siempre se da de a pares  $PCD \rightarrow PICC$ ,  $PICC \rightarrow PCD$  utilizando la siguiente secuencia:

- Trama PCD:
  - Comienza con el símbolo de «Inicio» de comunicación.
  - Envía la información.
  - Finaliza con el símbolo de «Fin» de comunicación.
- Se espera un tiempo FDT (*Frame Delay Time*) de PCD a PICC.
- Trama PICC:
  - Comienza con el símbolo de «Inicio» de comunicación.
  - Envía la información.
  - Finaliza con el símbolo de «Fin» de comunicación.
- Se espera un tiempo FDT de PICC a PCD.

El «tiempo de demora entre tramas» (FDT) está definido como el tiempo que deben esperar PCD y PICC desde la finalización de un mensaje hasta el comienzo de la respuesta. El «FDT de PCD a PICC» es el tiempo transcurrido desde que el PCD envía la última pausa en su transmisión hasta que la PICC envía el primer flanco de modulación del bit de «Inicio» de comunicación, como se esquematiza en la figura 1.5. Este tiempo juega un papel fundamental en el procedimiento anticolidión ya que sincroniza las respuestas de todas las PICC y esto permite al PCD detectar las colisiones que pudieran ocurrir. Por otro lado, también se define el «FDT de PICC a PCD» como un tiempo de *al menos*  $1172/f_c$  entre el último flanco de modulación transmitido por la PICC y la primera pausa enviada por el PCD.

El «FDT de PCD a PICC» depende del último bit transmitido por el PCD, ya que de tratarse de un «0» lógico el símbolo de fin de comunicación estará representado por las secuencias Z e Y, mientras que si la transmisión del PCD finaliza con un «1» lógico el símbolo de «Fin» serán dos secuencias Y, según la codificación de la tabla 1.2. Esto cambia el instante en que se produce la última pausa, que es desde donde comienza a correr el tiempo de demora. El estándar define este tiempo como el correspondiente a  $N \cdot 128 + 84$  períodos de la señal portadora, cuando el último bit transmitido por el PCD es un «1», y  $N \cdot 128 + 20$  cuando el último bit es un «0».  $N$  debe ser igual a 9 cuando se responde a los comandos de inicialización (REQA, WUPA, SELECT) dando como resultado 1236 o 1172 períodos respectivamente. Para cualquier otro comando  $N$  deberá ser mayor o igual a 9.

La tercera parte del estándar define tres tipos de tramas que son utilizadas en contextos particulares. Todas ellas comienzan con el símbolo «Inicio» de



**Figura 1.5:** El tiempo de demora entre tramas (FDT: *Frame Delay Time*) de PCD a PICC depende del último bit de información transmitido.

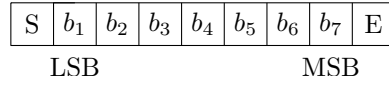
comunicación, finalizan con el símbolo «Fin» de comunicación y siempre los datos son enviados comenzando por el bit menos significativo. En la figura 1.6 se observa la estructura de este tipo de tramas.

La primera trama es llamada «trama corta» (*short frame*) y es utilizada por el lector para iniciar la comunicación a través de comandos simples. Está compuesta por 7 bits que representan el comando que envía el PCD a la PICC.

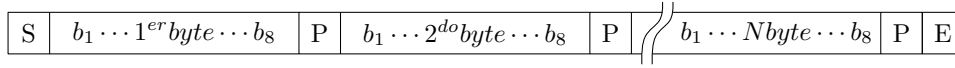
Por otro lado se define la «trama estándar» (*standard frame*) que se utiliza para el intercambio de información. Es una trama de longitud variable con  $N$  bytes ( $N \times 8$  bits) de datos, transmitidos en serie luego del símbolo de «Inicio». A cada byte se le agrega un bit de paridad  $P$  de forma tal que la cantidad de unos lógicos por dupla (byte; $P$ ) sea impar.

La tercera trama es llamada «trama anticollisión orientada a bits» (*Bit Oriented Anticollision Frame*). Se trata de una trama estándar de 7 bytes de largo dividida en dos partes. La primera parte es enviada por el PCD a la PICC y contiene el comando de selección de tarjeta, la cantidad de bits válidos que serán transmitidos y parte del número de identificación (ID) de una de las PICC. El resto del número de identificación se completa con la respuesta de la PICC, que envía la segunda parte de la trama anticollisión sólo si el número de identificación parcial transmitido por el PCD coincide con el comienzo del ID de la tarjeta. En el caso en que el número de identificación parcial transmitido por el PCD coincida con parte del ID de más de una tarjeta, todas ellas responderán en forma sincronizada con la parte restante de su propio ID, produciéndose en ese caso colisiones en los bits que sean diferentes.

Se dice que hubo una colisión cuando dos transponders transmiten en forma sincronizada bits diferentes. Cuando esto ocurre se modula con la subportadora el tiempo completo de duración de un bit, ya que si, por

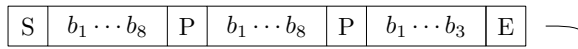


(a) Trama corta: 7 bits que representan un comando y los símbolos de «Inicio» y «Fin» de comunicación.

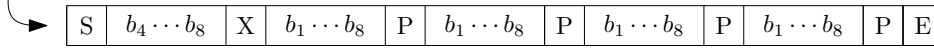


(b) Trama estándar: N bytes, cada uno formando un dupla con el bit de paridad de forma tal que la cantidad de «1» de la dupla sea impar.

Parte 1, PCD a PICC:



Parte 2, PICC a PCD:



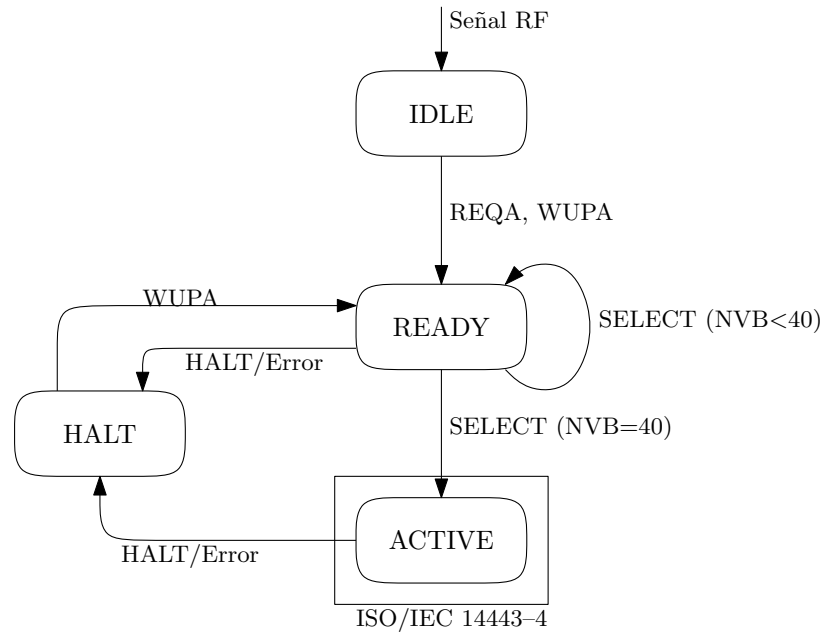
(c) Trama anticolisión: Se divide la trama estándar en dos partes. La división puede darse en cualquier lugar salvo en los dos primeros bytes. El bit de paridad correspondiente al byte dividido no se tiene en cuenta.

**Figura 1.6:** Tramas definidas por el estándar.

ejemplo, una tarjeta transmite un «1» y la otra un «0», la primera modula con subportadora durante una mitad del bit y la segunda modula la otra mitad del bit, dando como resultado una modulación completa. El lector debe ser capaz de detectar este tipo de colisiones.

Finalmente la tercera parte de la norma define una serie de estados que deben atravesar las PICC desde que reciben la alimentación hasta que una de ellas es seleccionada para establecer una comunicación. Al ingresar dentro del campo del PCD una tarjeta debe comenzar en el estado IDLE. En ese momento el lector puede realizar el intercambio de datos con otra PICC dentro del alcance sin ser interrumpido por la tarjeta que acaba de ingresar, ya que las PICC en el estado IDLE solo responderán a los comandos REQA (*Request A*) o WUPA (*Wake UP A*) [16, sec. 6.4.1]. Estos comandos son enviados por el PCD en forma de tramas cortas, lo que asegura que los datos destinados a otra PICC dentro de la zona de interrogación no sean falsamente interpretados como comandos REQA o WUPA.

Si una tarjeta en estado IDLE recibe un comando REQA válido deberá contestar con una trama estándar ATQA (*Answer To Request A*) de dos bytes de longitud. Luego de enviar la respuesta la tarjeta pasa al estado READY. El lector reconoce entonces que existe al menos un transponder dentro del campo de interrogación y por lo tanto comienza el algoritmo anticolisión transmitiendo el comando SELECT [16, sec. 6.4.2].



**Figura 1.7:** Diagrama de estados del transponder de acuerdo al estándar ISO/IEC 14443.

El procedimiento anticolisión utilizado funciona como un algoritmo de búsqueda binaria. La primera parte de la trama anticolisión es utilizada para informar el criterio de búsqueda de un ID con un determinado número de bits válidos NVB (*Number of Valid Bits*), mientras que la segunda parte contiene las respuestas de todas las PICC que cumplen con el criterio informado. Si se produce al menos una colisión en las respuestas, el PCD incrementa el número de bits válidos decidiendo por una u otra de las PICC que produjeron la colisión. El algoritmo finaliza cuando no existen colisiones y el lector obtiene el ID completo de una de las tarjetas.

El largo de un número de identificación simple es de 4 bytes [16, sec. 6.5.4]. Para elegir una de las PICC el lector envía el comando SELECT seguido de  $(4 \times 8)$  bits válidos. El transponder cuyo ID fue enviado debe confirmar el comando de selección respondiendo SAK (*Select Acknowledge*) y pasar al estado ACTIVE. En este estado se realiza el intercambio de paquetes de datos, que se definen en la parte 4 de la norma y están fuera del alcance del presente trabajo.

Cuando el lector finaliza la comunicación con una PICC envía el comando HALT y pone al transponder en un estado de reposo similar a IDLE. En este estado el transponder solo responderá al comando WUPA, que se utiliza para volver poner el tag en el estado READY y volver a comenzar. En caso de existir un error en la comunicación el transponder debe pasar automáticamente al estado HALT.

## 1.4. Resumen del capítulo

En este capítulo se presentó una breve introducción al tema de RFID, donde se explicó la teoría básica de funcionamiento, la transmisión de energía, de datos y reloj entre lector y transponder. Luego se hizo un repaso por los tipos de sistemas de RFID existentes y su clasificación y finalmente se llegó al estándar ISO/IEC 14443, que es la norma en que se basa el dispositivo a diseñar. A continuación se hará una pequeña reseña del capítulo que el lector debería tener presente a medida que avanza con la lectura:

- Se llama PCD (*Proximity Coupling Device*) al lector, es decir, el dispositivo que produce el campo magnético, y PICC (*Proximity Integrated Circuit Card*) al transponder, el dispositivo que contiene la información.
- En la norma se trabaja con acoplamiento inductivo a una frecuencia  $f_c = 13,56$  MHz. A esta señal se la llama *señal portadora*.
- El transponder debe funcionar dentro del rango de intensidad de campo dado por la tabla 1.1.
- La comunicación es del tipo pregunta-respuesta. El lector mantiene el campo dentro de su volumen de operación y encuesta a los transponders que ingresan dentro del volumen.
- El PCD transmite hacia la PICC modulando la portadora en ASK 100 % según las secuencias de la tabla 1.3.
- La PICC transmite hacia el PCD a través de modulación de carga. La portadora es modulada con una subportadora de frecuencia  $f_s = f_c/16$  según las secuencias de la tabla 1.3. Existe una amplitud mínima de modulación que debe superarse.
- El FDT (*Frame Delay Time*) es el tiempo de demora entre el fin de la transmisión del lector y el inicio de la respuesta del transponder.
- Existen tres tipos de tramas: corta, estándar y anti-colisión.





# Bibliografía

- [1] *Design Compiler Graphical*. <http://www.synopsys.com/Tools/Implementation/RTLSynthesis/DCGraphical/Pages/default.aspx>.
- [2] *DIP40 from Kyocera*. <http://www.mosis.com/pages/Technical/Packaging/Ceramic/menu-pkg-ceramic>.
- [3] *GNU Octave Web Page*. <https://www.gnu.org/software/octave/>.
- [4] *GTKwave Web Page*. <http://gtkwave.sourceforge.net/>.
- [5] *IC Compiler Place and Route System*. <http://www.synopsys.com/Tools/Implementation/PhysicalImplementation/Pages/ICCompiler.aspx>.
- [6] *Icarus Verilog Web Page*. <http://iverilog.icarus.com/>.
- [7] *LTSpice*. <http://en.wikipedia.org/wiki/LTspice>.
- [8] *Mentor Graphics IC Design*. [http://www.mentor.com/products/ic\\_nanometer\\_design/custom-ic-design/](http://www.mentor.com/products/ic_nanometer_design/custom-ic-design/).
- [9] *MOSIS Integrated Circuit Fabrication Service*. <http://www.mosis.com/>.
- [10] *Oklahoma State University System on Chip Design Flows*. [http://vlsiarch.ecen.okstate.edu/?page\\_id=12](http://vlsiarch.ecen.okstate.edu/?page_id=12).
- [11] *Identification cards — Test methods — Part 6: Proximity cards*, 2000.
- [12] *Identification cards — Physical characteristics*, 2003.
- [13] *IEEE Standard for Verilog Hardware Description Language*. IEEE Std 1364-2005 (Revision of IEEE Std 1364-2001), páginas 1–560, 2006.
- [14] *Identification cards - Contactless integrated circuit(s) cards - Proximity cards - Part 1: Physical characteristics*, 2007.
- [15] *Identification cards - Contactless integrated circuit(s) cards - Proximity cards - Part 4: Transmission protocol*, 2007.

- [16] *Identification cards - Contactless integrated circuit(s) cards - Proximity cards - Part 3: Initialization and anticollision*, 2008.
- [17] *Identification cards - Contactless integrated circuit(s) cards - Proximity cards - Part 2: Radio frequency power and signal interface*, 2009.
- [18] Alcalde Bessia, Fabricio, Diego Fanego y Guillermo Makar: *Diseño de un TAG RFID integrado en un proceso CMOS de 0,5 $\mu$ m*. En *CASE 2012, Congreso Argentino de Sistemas Embebidos*, página 120, August 2012, ISBN 978-987-9374-82-5. <http://www.sase.com.ar/2012/congreso-argentino-de-sistemas-embebidos-case-2012/>.
- [19] Baker, Jacob: *CMOS Circuit design, layout and simulation*. Wiley-Interscience, 2005.
- [20] Finkenzeller, Klaus: *RFID Handbook*. Wiley, 3<sup>a</sup> edición, 2010.
- [21] Gray, P., P. Hurst, S. Lewis y R. Mayer: *Analysis and design of analog integrated circuits*. John Wiley, 2001.
- [22] Gudnason, Gunnar y Erik Bruun: *CMOS circuit design for RF sensors*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [23] Hastings, Alan: *The art of analog layout*. Prentice Hall, 2001.
- [24] Himanshu, Bhatnagar: *ADVANCED ASIC CHIP SYNTHESIS Using Synopsys<sup>®</sup> Design Compiler<sup>™</sup> Physical Compiler<sup>™</sup> and PrimeTime<sup>®</sup>*. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.
- [25] Kamon, M., M.J. Tsuk y J.K. White: *FASTHENRY: a multipole-accelerated 3-D inductance extraction program*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 42(9):1750–1758, Sept 1994, ISSN 0018-9480.
- [26] Mandolesi, P., G. San Martín y Julián P.: *RFID Front-End in 0.5 $\mu$ m Standard CMOS process: Experimental results*. En *Proceedings of the Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications 2008*, 2008.
- [27] Marechal, Catherine y Dominique Paret: *Optimization of the law of variation of shunt regulator impedance for Proximity Contactless Smart Card Applications to reduce the loading effect*. Informe técnico, Laboratoire LRIT – ESIGETEL.
- [28] Zhu, Zheng, Ben Jamali y Peter H. Cole: *Brief Comparison of Different Rectifier Structures for RFID Transponders*. Informe técnico, Auto-ID lab at University of Adelaide.