

**Universidad de la República**  
**Facultad de Ingeniería**

Proyecto de fin de carrera

**Recarga Fácil por Radio Frecuencia**  
*RF<sup>2</sup>*

**Daniel Aicardi, Melina Rabinovich, Edgardo Vaz**

Tutores: Ing. Juan Pablo Oliver, Ing. Andrés Aguirre

Montevideo, Uruguay

Julio 2011

## **Recarga Fácil por Radio Frecuencia**

### **Resumen**

*El presente documento describe el prototipo Recarga Fácil por Radio Frecuencia, RF<sup>2</sup>, realizado como proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de la República Oriental del Uruguay entre marzo de 2010 y julio de 2011. El mismo consiste en un sistema embebido para recarga y consulta de tarjetas RFID, como las que se utilizan hoy día en el sistema de transporte metropolitano, y fue pensado para operar de forma autónoma interactuando directamente con el usuario.*

*El hardware fue enteramente diseñado por el grupo de trabajo a excepción de la single board computer. Las herramientas de software utilizadas son open source, así como también las librerías usadas para desarrollar la aplicación final. El diseño, la fabricación, y el armado del prototipo fue realizado en su totalidad en Uruguay.*

## **Agradecimientos**

En primer lugar queremos agradecer a nuestras familias y amigos. Agradecemos al grupo de robótica del INCO, a Leonardo Steinfeld, Nicolás Barabino, Francisco Lanzari, María Eugenia Corti, Santiago Reyes, Viterbo Rodríguez, Christian Gutierrez, Andrés Bergeret, Gonzalo Tabares, Klaus Rotzinger, Marcelo Fiori, Pablo Cancela, Ana y Claudia Rabino. Y a todos los que de alguna forma u otra colaboraron con nosotros.

A nuestras familias.

## Prefacio

*“El ciudadano Línea saca su billetera, extrae su tarjeta y la introduce en la máquina registradora; una serie de gestos automáticos. Unas mandíbulas de aluminio se cierran sobre ella, unos dientes de cobre buscan la clave magnética, y una lengua electrónica saborea la vida del ciudadano Línea. Lugar y fecha de nacimiento. Padres. Raza. Religión. Historial educativo, militar y de servicios civiles. Estado. Hijos. Ocupaciones, desde el comienzo hasta el presente. Asociaciones. Medidas físicas, huellas digitales, retínicas, grupo sanguíneo. Grupo psíquico básico. Porcentaje de lealtad, índice de lealtad en función del tiempo hasta el momento del último análisis... ... El ciudadano Línea se encuentra en la ciudad donde, la noche anterior, dijo que estaría, así que no ha tenido que hacer una corrección. Los nuevos informes se añaden al historial del ciudadano Línea. Toda su vida regresa al banco de datos. Desaparece de la unidad exploradora y la unidad comparativa, para que éstas atiendan la próxima llegada. La máquina ha tragado y digerido otro día. Está satisfecha.”*

*Sam Hall (1953), Poul Anderson*

La narración anterior es parte de un cuento de ciencia ficción llamado “Sam Hall”, escrita por Poul Anderson en 1953. En esta historia el autor describe un mundo donde cada persona tiene asignada una tarjeta conteniendo datos que la caracterizan, y puede ser controlado su accionar a través de una super computadora que almacena y procesa los datos de toda la humanidad. En nuestros días este cuento de ciencia ficción no está tan alejado de la realidad, las tarjetas “inteligentes” (smart cards) son cada vez más usadas en múltiples aplicaciones como ser, pasaporte electrónico, pago electrónico, sistemas de transporte, controles de acceso y sistemas de seguridad, entre otros. El siguiente proyecto se desarrolla con la intención de aprender las bases del mundo de las tarjetas “inteligentes” y que sirva como punto de partida para que otros entiendan su funcionamiento. Los autores no desean que se use el contenido de este documento con fines como los que se indicaban en la narrativa de ciencia ficción, muy por el contrario, el empleo de esta tecnología debe estar en favor de las personas y no en su contra.

# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| Título . . . . .  | I         |
| Resumen . . . . .                                       | II        |
| Agradecimientos . . . . .                               | III       |
| Dedicatoria . . . . .                                   | IV        |
| Prefacio . . . . .                                      | V         |
| Tabla de contenidos . . . . .                           | VI        |
| Índice de figuras . . . . .                             | IX        |
| Índice de cuadros . . . . .                             | X         |
| <br>  |           |
| <b>I Introducción</b>                                   | <b>1</b>  |
| <br>  |           |
| <b>1. Descripción del proyecto</b>                      | <b>2</b>  |
| 1.1. Definición . . . . .                               | 2         |
| 1.2. Antecedentes . . . . .                             | 2         |
| <br>  |           |
| <b>2. Objetivo general del proyecto</b>                 | <b>3</b>  |
| 2.1. ¿Qué y para qué? . . . . .                         | 3         |
| 2.2. ¿Por qué cambiar la arquitectura actual? . . . . . | 3         |
| 2.3. Alcance . . . . .                                  | 4         |
| 2.4. Especificación funcional . . . . .                 | 4         |
| 2.5. Criterios de éxito . . . . .                       | 5         |
| <br>  |           |
| <b>II Diseño</b>  | <b>6</b>  |
| <br>  |           |
| <b>3. Funcionamiento del prototipo</b>                  | <b>7</b>  |
| 3.1. Requerimientos . . . . .                           | 7         |
| 3.2. Descripción del prototipo . . . . .                | 7         |
| 3.3. Funcionamiento general del prototipo . . . . .     | 8         |
| <br>  |           |
| <b>4. Hardware</b>                                      | <b>10</b> |
| 4.1. Arquitecturas estudiadas . . . . .                 | 10        |
| 4.2. Arquitectura seleccionada . . . . .                | 13        |
| 4.3. Elección de hardware . . . . .                     | 14        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.3.1.    | SBC . . . . .   | 14        |
| 4.3.2.    | VLT - Conversor de Voltajes . . . . .                             | 15        |
| 4.3.3.    | SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario . . . | 16        |
| 4.3.4.    | Lector/Escritor RFID . . . . .                                    | 17        |
| 4.4.      | Funcionamiento de módulos . . . . .                               | 17        |
| 4.4.1.    | SBC . . . . .   | 17        |
| 4.4.2.    | VLT - Conversor de Voltajes . . . . .                             | 17        |
| 4.4.3.    | SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario . . . | 19        |
| 4.4.4.    | Lector/Escritor RFID . . . . .                                    | 20        |
| <b>5.</b> | <b>Documentos y esquemáticos del hardware</b>                     | <b>25</b> |
| 5.1.      | Herramientas de diseño . . . . .                                  | 25        |
| 5.2.      | Esquemáticos y componentes . . . . .                              | 25        |
| 5.2.1.    | SBC . . . . .   | 27        |
| 5.2.2.    | VLT - Conversor de Voltajes . . . . .                             | 28        |
| 5.2.3.    | SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario . . . | 30        |
| 5.2.4.    | Lector/Escritor RFID . . . . .                                    | 35        |
| <b>6.</b> | <b>Software</b>   | <b>39</b> |
| 6.1.      | Introducción . . . . .  | 39        |
| 6.2.      | Arquitectura de Software . . . . .                                | 39        |
| 6.2.1.    | Descripción . . . . .   | 39        |
| 6.2.2.    | Sistema Operativo . . . . .                                       | 41        |
| 6.2.3.    | Librerías . . . . .   | 42        |
| 6.3.      | Herramientas utilizadas en el desarrollo del sistema . . . . .    | 42        |
| 6.3.1.    | Introducción . . . . .  | 42        |
| 6.3.2.    | Generación de MLO, u-boot.bin y uImage . . . . .                  | 42        |
| 6.3.3.    | Generación de FS . . . . .  | 43        |
| 6.3.4.    | Croscopilación . . . . .  | 43        |
| 6.3.5.    | Depuración de código . . . . .                                    | 43        |
| 6.3.6.    | Librerías . . . . .   | 43        |
| 6.4.      | Desarrollo . . . . .  | 43        |
| 6.4.1.    | MLO . . . . .   | 43        |
| 6.4.2.    | Multiplexado de pines . . . . .                                   | 43        |
| 6.4.3.    | u-boot . . . . .  | 44        |
| 6.4.4.    | uImage . . . . .  | 47        |
| 6.4.5.    | FileSystem . . . . .  | 50        |
| 6.4.6.    | Librerías . . . . .   | 50        |
| 6.5.      | Ejecución de programa principal . . . . .                         | 50        |
| 6.5.1.    | Script para ejecución autónoma . . . . .                          | 50        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>III</b> | <b>Ensayos</b>  | <b>51</b> |
| <b>7.</b>  | <b>Ensayos</b>  | <b>52</b> |
| 7.1.       | SBC . . . . .   | 52        |
| 7.2.       | VLT - Conversor de Voltajes . . . . .                                 | 53        |
| 7.3.       | SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de usuario . . . . . | 53        |
| 7.4.       | Lector/Escritor RFID . . . . .  | 56        |
| <b>IV</b>  | <b>Compras</b>  | <b>59</b> |
| <b>8.</b>  | <b>Compras</b>  | <b>60</b> |
| 8.1.       | SBC . . . . .   | 60        |
| 8.2.       | PCBs . . . . .  | 61        |
| 8.3.       | VLT . . . . .   | 61        |
| 8.4.       | SCUI . . . . .  | 62        |
| 8.5.       | Lector-Escritor RFID . . . . .  | 64        |
| <b>V</b>   | <b>Anexos</b>   | <b>67</b> |
| <b>A.</b>  | <b>Lector/Escritor RFID</b>   | <b>68</b> |
| A.1.       | Reglas y Parámetros de Diseño de una Antena RF . . . . .              | 68        |
| A.1.1.     | Diseño del inductor . . . . .   | 68        |
| A.1.2.     | Capacitores del circuito resonante . . . . .                          | 70        |
| A.1.3.     | Sintonizar el circuito resonante . . . . .                            | 70        |
| A.1.4.     | Valor de $ITVDD$ . . . . .  | 71        |
| A.1.5.     | Factor de calidad $Q$ . . . . .                                       | 72        |
| A.1.6.     | Circuito receptor . . . . .   | 74        |
| <b>VI</b>  | <b>Bibliografía</b>   | <b>77</b> |



# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Diagrama de flujo . . . . .   | 9  |
| 4.1. Solución considerada 1 . . . . .  | 10 |
| 4.2. Solución considerada 2 . . . . .  | 11 |
| 4.3. Solución considerada 3 . . . . .  | 11 |
| 4.4. Solución considerada 4 . . . . .  | 12 |
| 4.5. Solución considerada 5 . . . . .  | 12 |
| 4.6. Diagrama de bloques de la arquitectura seleccionada . . . . .                       | 14 |
| 4.7. Arquitectura de una celda I/O del TXB0108 . . . . .                                 | 18 |
| 5.1. Esquemático de la placa VLT - Voltage Level Translator . . . . .                    | 29 |
| 5.2. Esquemático de la placa SCUI . . . . .  | 32 |
| 5.3. Esquemático del lector de tarjetas de contacto, incluido en la placa SCUI . . . . . | 33 |
| 5.4. Esquemático de la interfaz de usuario, incluido en la placa SCUI . . . . .          | 34 |
| 5.5. Esquemático del módulo digital del lector/escritor RFID . . . . .                   | 37 |
| 5.6. Esquemático de la antena RFID, Inductor + Adaptación de impedancia . . . . .        | 38 |
| 6.1. Sistema $RF^2$ . . . . .  | 40 |
| 6.2. Memoria SD . . . . .  | 41 |
| 6.3. Editor de configuración del kernel . . . . .  | 48 |
| 6.4. Configuración SPI . . . . .   | 49 |
| 6.5. Configuración USB Gadget . . . . .  | 49 |
| A.1. Forma de pulso acorde a la norma ISO 14443 . . . . .                                | 73 |
| A.2. Esquema de una antena, identificando sus principales secciones . . . . .            | 75 |
| A.3. Blindaje de una antena en un diseño de 4 capas . . . . .                            | 76 |

# Índice de cuadros

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.1. | Conector 14x2 Beagleboard – VLT . . . . .   | 26 |
| 5.2. | Conector 20x2 VLT - SCUI . . . . .  | 27 |
| 5.3. | SBC y lista de accesorios . . . . .   | 27 |
| 5.4. | Lista de componentes de la placa de circuito impreso VLT . . . . .                  | 28 |
| 5.5. | Lista de componentes del lector de tarjetas de contacto, SC . . . . .               | 30 |
| 5.6. | Lista de componentes para la interfaz de usuario, LCD . . . . .                     | 31 |
| 5.7. | Lista de componentes de la antena RF, Inductor + Adaptación de impedancia . . . . . | 35 |
| 5.8. | Lista de componentes del lector/escritor RFID, sin la antena RF . . . . .           | 36 |
| 8.1. | SBC . . . . .   | 60 |
| 8.2. | PCBs . . . . .  | 61 |
| 8.3. | VLT . . . . .   | 61 |
| 8.4. | SC . . . . .  | 62 |
| 8.5. | LCD . . . . .   | 63 |
| 8.6. | Inductor + Adaptación . . . . .   | 64 |
| 8.7. | CL RC632 + filtro EMC . . . . .   | 66 |
| A.1. | Duración de los pulsos en $\mu s$ - ISO 14443 . . . . .                             | 73 |

# **Parte I**

## **Introducción**

# Capítulo 1

## Descripción del proyecto

### 1.1. Definición

A partir de la puesta en marcha del sistema de transporte metropolitano, surge la necesidad de consultar y recargar tarjetas RFID (utilizadas en dicho sistema) en línea con un servidor, de forma rápida, segura y autogestionada por parte del usuario, en diversos puntos de Montevideo.

### 1.2. Antecedentes

- AFE: Prototipo de sistema embebido capaz de cargar y consultar tarjetas RFID como las utilizadas en el sistema de transporte metropolitano. El mismo se compone de varios módulos: una SBC (single board computer), un lector/escritor de tarjetas RFID, un lector de tarjetas de contacto, un módem 3G/GPRS y una interfaz con el usuario que consta de un display, leds y buzzer.
- OpenPCD: Diseño de hardware libre para dispositivos de proximidad de acoplamiento (PCD) basado en comunicación RF de 13,56MHz. Este dispositivo es capaz de desplegar información desde Tarjetas de proximidad de Circuito Integrado (PICC) que se ajusten a las normas de proveedores independientes, tales como ISO 14443, ISO 15693, así como los protocolos propietarios como Mifare Classic.

## Capítulo 2

### Objetivo general del proyecto

#### 2.1. ¿Qué y para qué?

En principio, el objetivo del proyecto era realizar un prototipo de sistema embebido mediante el cual se pudiera interactuar con tarjetas RFID (basadas en las normas ISO 14443) como las usadas en el sistema de transporte metropolitano. Mejorar la arquitectura actual del dispositivo AFE rompiendo dependencias tecnológicas con el actual lector/escritor de tarjetas Mifare.

Para lograrlo se partiría de la base de un dispositivo open-hardware y open-firmware (OpenPCD).

Luego se dejó de lado el partir del dispositivo OpenPCD, para lograr un diseño propio de lector/escritor de tarjetas RFID.

#### 2.2. ¿Por qué cambiar la arquitectura actual?

Como arquitectura precedente existe la del prototipo AFE (Artefacto Feo de Exhibir), realizada por el grupo de electrónica de la Intendencia de Montevideo. La misma consiste en una SBC, que se fabrica con otro propósito y es utilizada en esta aplicación puesto que es la única forma de adquirir este tipo de hardware en plaza. A ésta se conectan a través de puertos USB, un lector/escritor de tarjetas Mifare, un lector de tarjetas de contacto, un modem 3G y un dispositivo diseñado a partir de un microcontrolador PIC, llamado USB4ALL, el cual es open-hardware y open-firmware, en el que

se pueden conectar otro tipo de dispositivos cuya interfaz nativa no sea USB, como ser display, buzzer, leds, sensores, etc, los cuales no pueden ser conectados directamente a la SBC porque la misma no cuenta con los puertos de expansión necesarios.

Surge entonces la necesidad de cambiar la configuración de dicha arquitectura. Se hace necesario romper dependencias tecnológicas con el lector/escritor de tarjetas Mi-fare, ya que dejó de ser soportado por la librería pcsclite (a pedido del fabricante); y con la SBC, que es empleada en una aplicación específica y puede dejar de fabricarse o sufrir cambios drásticos que ya no permitan su uso.

### **2.3. Alcance**

- **Hardware:** Se fabricará un módulo donde se insertará la tarjeta de contacto (SAM). Se agregará un display, leds y buzzer como interfaz para el usuario. Se fabricará un módulo de lectura/escritura RFID. Se estudiará la forma de conectar los periféricos a la placa de la SBC.
- **Software:** Se hará lo necesario para que el lector/escritor RFID funcione como un dispositivo soportado por la librería librfid. Se hará lo posible para lograr compatibilidad hacia atrás con el AFE.

### **2.4. Especificación funcional**

El prototipo final deberá ser capaz de interactuar con tarjetas RFID a través de la antena del dispositivo lector/escritor RFID, y con una tarjeta de contacto (SAM). Luego de los controles correspondientes y autenticación de la tarjeta (con datos encriptados), comenzará la interacción con el usuario mediante un display que será la interfaz de comunicación con el mismo. El display informará al usuario de las tareas que se estén realizando, mensajes cortos y descriptivos. Los tiempos de recarga y consulta deberán ser menores a un minuto.

## **2.5. Criterios de éxito**

- Lograr recargar y consultar tarjetas RFID mediante el dispositivo embebido.
- Los tiempos de recarga y consulta deberán ser menores a un minuto.

## **Parte II**

### **Diseño**



## Capítulo 3

# Funcionamiento del prototipo

### 3.1. Requerimientos

El principal requerimiento a cumplir es la interacción con tarjetas RFID de acuerdo a la norma ISO14443, tanto para su lectura como escritura. La comunicación con tarjetas de contacto de acuerdo a la norma ISO7816 es necesaria para la interacción con un módulo de seguridad que permita la generación de las claves usadas para autenticarse con las tarjetas RFID. Por último mantener informado al usuario de lo que sucede durante una transacción a través de una simple interfaz visual y sonora.

### 3.2. Descripción del prototipo

Este prototipo integra la lista de dispositivos que hoy en día se hacen llamar sistemas embebidos. Su hardware está integrado por una Single Board Computer (SBC), con un conversor de niveles de tensión (VLT), a la cual se conectan un lector/escritor de tarjetas RFID basadas en la norma ISO14443, un lector de tarjetas de contacto compatibles con la norma ISO7816, y la interfaz de usuario compuesta por un buzzer, leds y un display LCD16x2. Entre las ventajas que podemos hallar en este dispositivo es que el lector/escritor de tarjetas RFID es un diseño realizado en PCB de dos capas que lo hace más sencillo y económico que el diseño del lector/escritor OpenPCD, y al igual que este último es compatible con la librería open source conocida como librfid. Por su lado, en el lector de tarjetas de contacto debemos destacar su simplicidad, ya que no cuenta

con ningún tipo de hardware específico (ASIC) que cumpla con el estándar ISO7816, sólo es necesario tener disponible un puerto serial (UART) y con un par de puertos de entrada/salida de propósito general para lo que tiene que ver con el manejo del oscilador y el reset para la tarjeta de contacto. Esto lo hace portable a cualquier SBC que cuente con los puertos detallados anteriormente. Para la interfaz de usuario es necesario contar con siete puertos de entrada/salida de propósito general, para lo que es el control y la entrada de caracteres en el display, con cuatro puertos más para los leds y el buzzer.

### 3.3. Funcionamiento general del prototipo

Una vez que el prototipo  $RF^2$  se encuentra operativo, el dispositivo despliega en el display el mensaje “Aproxime su tarjeta”, permaneciendo en dicho estado hasta que algún usuario acerque una tarjeta al lector/escritor RFID. En la primera transacción entre lector y tarjeta se obtiene el identificador único (UID) de ésta última, que será enviado al módulo de seguridad, SAM (previa autenticación exitosa), para que a partir de éste, se generen las claves de acceso que permitan la lectura y escritura de la tarjeta RFID. Mientras se lleva a cabo la operación, se despliega en el display el mensaje, “No retire su tarjeta” a la vez que el led amarillo es encendido para indicar precaución ya que se están procesando datos. La siguiente acción a llevar a cabo es verificar que la tarjeta del usuario tenga saldo pendiente de acreditar, en caso afirmativo se indica al usuario el saldo a acreditar a través del display con el mensaje “Saldo a acreditar \$...”. Si todo fue exitoso, se borra el saldo transferido de la lista de saldos pendientes a acreditar para que no se transfiera saldo indefinidas veces. A continuación se despliega en el display el nuevo monto almacenado en la tarjeta, “Su saldo es de \$...”, se enciende el led verde y se emite un pitido mediante el buzzer en señal que la operación fue satisfactoria. Por último se muestran en el display los mensajes “Transacción finalizada”, “Gracias” y vuelve al inicio para comenzar un nuevo ciclo.

En caso que la tarjeta no tuviera saldo pendiente de acreditar, el prototipo  $RF^2$  funciona en modo consulta y despliega en el display el saldo disponible en la tarjeta, “Su saldo es de \$...”, encendiendo el led verde y emitiendo un pitido, seguido de los mensajes “Transacción finalizada”, “Gracias” y vuelve al inicio para comenzar un nuevo ciclo.

En caso de ocurrir un error durante alguno de los pasos anteriores, ya sea porque el usuario retiró la tarjeta en un momento inadecuado, o simplemente porque el prototipo no logró leer o escribir la tarjeta en forma correcta, se enciende el led rojo, se emite un doble pitido mediante el buzzer, y el display muestra el mensaje “Error, vuelva a intentarlo”, acto seguido el ciclo vuelve a comenzar.

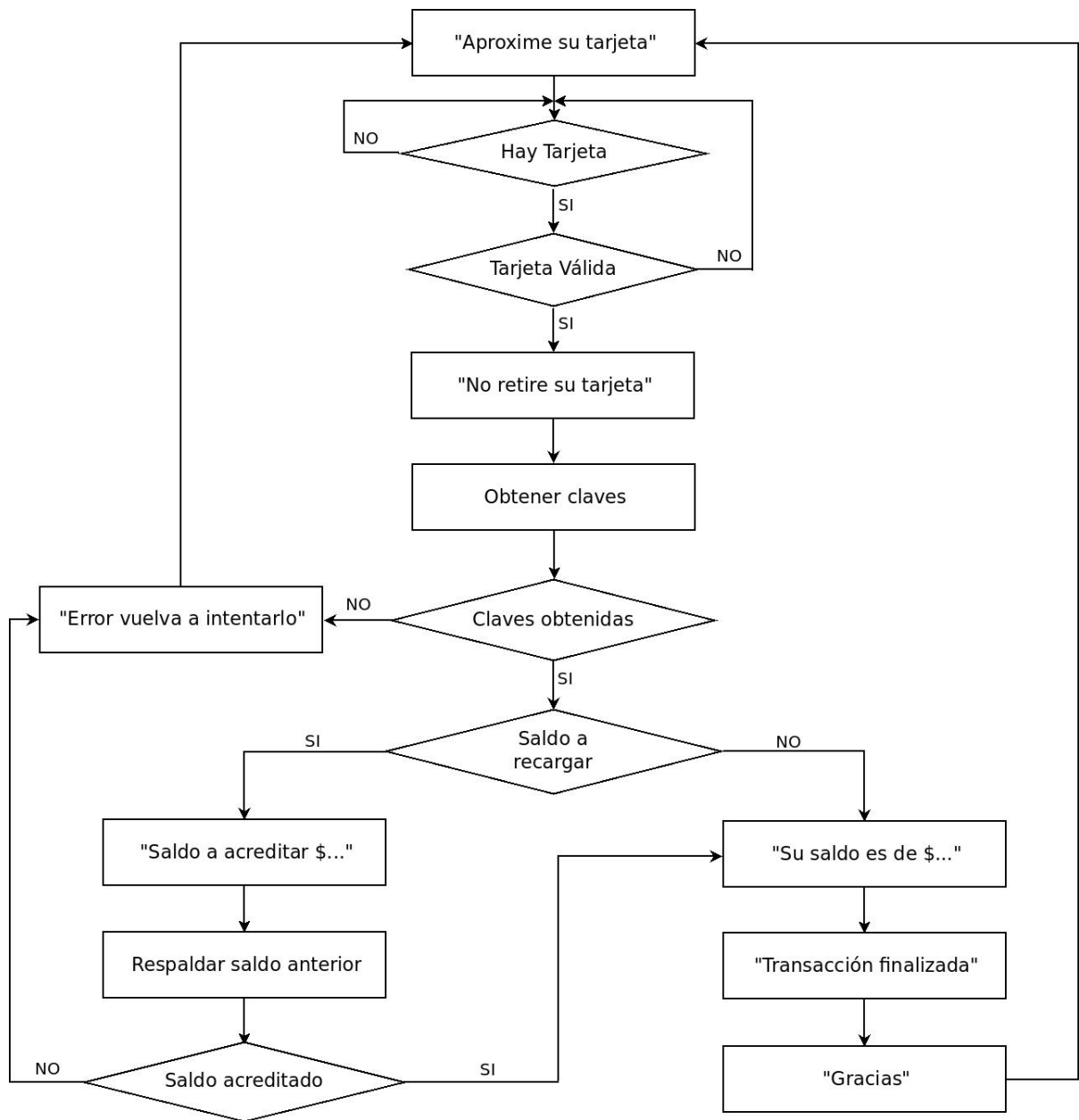


Figura 3.1: Diagrama de flujo

# Capítulo 4

## Hardware

### 4.1. Arquitecturas estudiadas

Se plantearon varias alternativas como posible solución. A medida que se encontraron limitantes o que no se cumplían los requerimientos exigidos, se fueron descartando dichas opciones.

A continuación se describen algunas de las arquitecturas consideradas:

- 1 - OpenPCD + lector de tarjetas de contacto + display + buzzer + leds

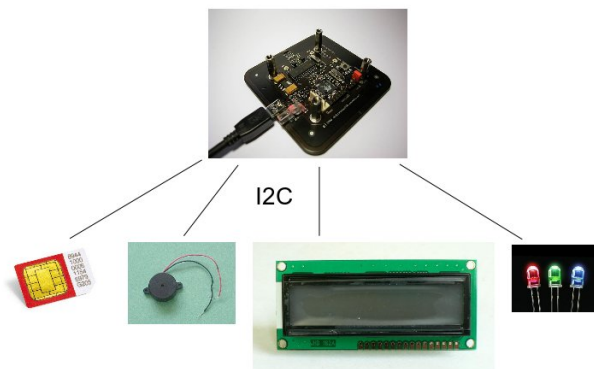


Figura 4.1: Solución considerada 1

Al dispositivo OpenPCD, se conecta el resto del hardware a través de su único puerto de entrada-salida disponible que es de tipo I2C.

- 2 - SBC + OpenPCD + microcontrolador + lector de tarjetas de contacto + display + buzzer + leds

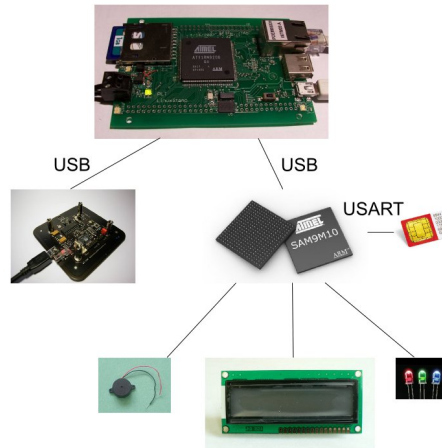


Figura 4.2: Solución considerada 2

Tanto el dispositivo OpenPCD como el microcontrolador se conectan directamente por USB a la SBC. El microcontrolador maneja el resto de los dispositivos (lector de tarjetas de contacto, display, buzzer y leds).

- 3 - SBC + OpenPCD + lector de tarjetas de contacto + display + buzzer + leds

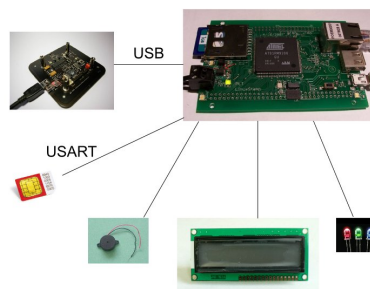


Figura 4.3: Solución considerada 3

El dispositivo OpenPCD se conecta por USB a la SBC. La SBC maneja los dispositivos (lector de tarjetas de contacto, display, buzzer y leds) a través de sus interfaces nativas.

- 4 - SBC + lector de tarjetas RFID + lector de tarjeta de contacto + display + buzzer + leds

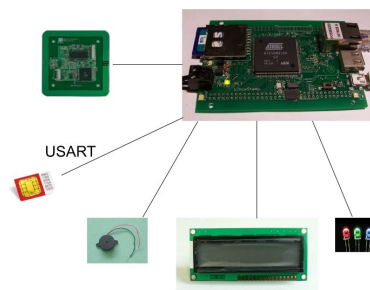


Figura 4.4: Solución considerada 4

Todos los periféricos se conectan a la SBC a través de sus interfaces nativas, esto incluye también el integrado CL RC632 de Philips. Se debe diseñar la antena para propagar la señal RF hacia las tarjetas.

- 5 - microcontrolador + lector de tarjetas RFID + lector de tarjeta de contacto + display + buzzer + leds

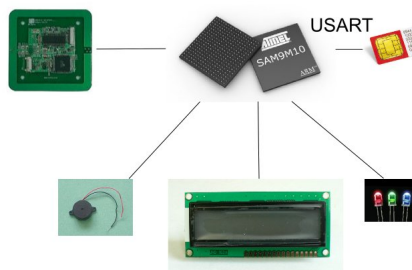


Figura 4.5: Solución considerada 5

Consta de un único PCB, que posee un microcontrolador como sistema central al cual se conectan el resto de los dispositivos. Dicho PCB tiene incorporada la antena para la propagación de RF.

## 4.2. Arquitectura seleccionada

En una primera instancia se pretendía utilizar únicamente el dispositivo OpenPCD (ver Figura 4.1), ya que el mismo cuenta con un microcontrolador de la familia ARM, el AT91SAM7S128, una vez estudiado se llegó a la conclusión de que no permitía la instalación de un kernel de Linux. Otra desventaja encontrada fue que sólo tiene un puerto I2C como forma de conectar periféricos.

Surgió entonces la necesidad de usar una SBC como dispositivo capaz de ejecutar un sistema operativo y las aplicaciones necesarias para que el dispositivo cumpla con los requerimientos exigidos. El dispositivo OpenPCD pasaría entonces a cumplir la función de lector/escritor de tarjetas RFID (ver Figuras 4.2 y 4.3), conectado a la SBC a través de su puerto USB, mientras que para el resto de los periféricos se diseñaría un PCB que fuera capaz de ser conectado a la SBC a través de sus interfaces nativas. Esta arquitectura fue descartada por el incremento en el costo del proyecto.

Fue necesario entonces descartar el uso del dispositivo OpenPCD y dar lugar a un diseño propio del lector/escritor de tarjetas RFID (ver Figura 4.4), utilizando para esto el integrado CL RC632 de Philips.

La última opción y la más ambiciosa, plantea el diseño completo de un PCB (ver Figura 4.5) conteniendo un microcontrolador y memoria capaz de ejecutar un sistema operativo, los lectores de tarjetas, tanto de contacto como RFID, y el resto de los periféricos (display, leds, buzzer). Esta opción fue dejada de lado por entender que excedería los plazos de tiempo del proyecto.

Se pensó entonces en diseñar la arquitectura SBC + lectores de tarjetas + display + buzzer + leds, y dado que se cuenta con un OpenPCD, la opción SBC + OpenPCD + lector de tarjetas de contacto + display + buzzer + leds se dejaría como arquitectura de respaldo por si no funcionara el lector de tarjetas RFID.

Luego de estudiar ventajas y desventajas de las arquitecturas planteadas, se eligió la que más se adaptó a los requerimientos necesarios:

- SBC + lector de tarjetas RFID + lector de tarjeta de contacto + display + buzzer + leds

En la figura 4.6 se muestra un diagrama de bloques correspondiente a la arquitectura seleccionada:

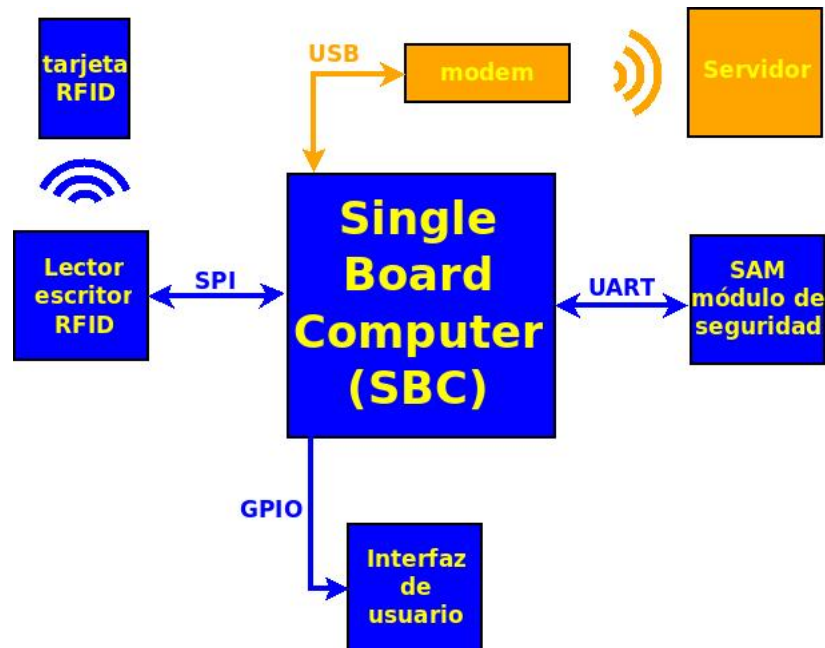


Figura 4.6: Diagrama de bloques de la arquitectura seleccionada

## 4.3. Elección de hardware

### 4.3.1. SBC

En primera instancia se confeccionó una lista con posibles candidatas de SBC disponibles en el mercado internacional, teniendo en cuenta factores como: precio, puertos de E/S, memoria RAM, memoria Flash, puertos USB, Linux embebido, entre otros. Se definieron una serie de requisitos mínimos necesarios para seleccionar de la lista la SBC que más se adecuara a la arquitectura definida. Para la comunicación con el resto de los módulos será necesario: una interfaz UART para el módulo de seguridad (SAM); una



interfaz SPI para el módulo lector/escritor RFID (CL RC632 de Philips); 20 GPIO para display, leds, buzzer, otros; 1 USB host para una posible conexión de un módem 3G (intercambio de datos con un servidor central). En cuanto a la memoria disponible debe ser de 32Mb de RAM y 8Mb de flash para el uso de un sistema operativo embebido. Es conveniente, pensando a futuro, que el procesador trabaje a una frecuencia no menor a 200MHz. Dado el presupuesto estimado para el proyecto, el precio no debe superar los 150 dólares en origen. Como requisito adicional se exigió que existiera un foro actualizado y soporte técnico que permitiera evacuar dudas.

Aplicados los requisitos mínimos a la lista previamente confeccionada de SBC candidatas, optamos por dos: GESBC-9G20 y Hawkboard. En cuanto a la primera opción, GESBC-9G20, los fabricantes no respondieron consultas, por tanto se descartó. Se optó entonces por la segunda opción, Hawkboard, puesto que respondieron a las consultas en tiempos razonables y se logró evacuar dudas desde el foro.

Luego de comprar dos Hawkboard, ambas resultaron defectuosas a nivel de hardware, después de varios meses de pruebas sin resultados y sin respuestas concretas por parte del proveedor y fabricante y con la intención de cumplir con los plazos del proyecto, se optó por utilizar una SBC (Beagleboard) que se consiguió en préstamo por medio del INCO. Ésta SBC cumplió con los requisitos mínimos, aunque en ese momento tenía un costo del doble de la Hawkboard, teniéndose que diseñar un módulo hardware adicional. Finalmente, la SBC seleccionada para trabajar fue la Beagleboard.

Las características generales de la BeagleBoard son: cuenta con un procesador OMAP 3530 de 720MHz con arquitectura ARM. Posee memoria NAND-flash de 256Mb y memoria ROM de igual tamaño. Tiene una ranura adicional para extender la memoria a través de una memoria SD. Entre otras cosas cuenta con un puerto USB OTG, un puerto USB host, un bloque de expansión de 28 pines (con señales a 1,8 Volts), puerto JTAG, conector RS232, etc.

#### **4.3.2. VLT - Conversor de Voltajes**

Este módulo no fue tenido en cuenta en la primera etapa del diseño de la arquitectura hardware, sino que surge como necesidad debido al cambio de SBC. Como consecuencia de lo anterior se vio la ventaja de incorporar una placa que permite la conexión entre

la SBC y el resto del hardware, el cual puede permanecer inalterado por más que no ocurra lo mismo con la SBC, ya que ésta puede cambiar de versión o dejar de fabricarse en un breve lapso de tiempo. El único elemento a cambiar sería entonces la placa VLT, que es más simple y barata de fabricar que las restantes partes. La placa de circuito impreso VLT consta básicamente de dos conectores, uno de ellos permite la conexión con la Beagleboard y el otro la conexión con el restante hardware el cual se encuentra integrado en un PCB llamdo SCUI. Ambos conectores no se encuentran directamente interconectados entre sí a través de pistas, pues para el caso particular de Beagleboard fue necesario incorporar conversores de tensión que permitieran el traslado del nivel de tensión desde 1,8 Volts que usa esta SBC, a las tensiones con las que operan los periféricos, ya sea 3,3 o 5 Volts. El último elemento, no menos importante, es un regulador de tensión LDO que permite generar 3,3 Volts a partir de la fuente de tensión de 5 Volts de la propia Beagleboard.

#### **4.3.3. SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario**

El módulo SCUI puede dividirse en dos partes, una de ellas es un lector de tarjetas de contacto basadas en la norma ISO7816, y la otra es una simple interfaz para el usuario. El lector de tarjetas de contacto (smart cards), está compuesto por un conversor full duplex a half duplex el cual se encuentra conectado a uno de los puertos UART de la SBC a través del módulo VLT, que se describió en el punto anterior. Este conversor permite la transmisión de datos directamente entre la tarjeta y la SBC, sin necesidad de intercalar un ASIC para el manejo de tarjetas del tipo ISO7816. Cuenta también con un oscilador para alimentar la entrada de reloj de las tarjetas. La entrada de control (OE) del oscilador operada desde la SBC permite poner la salida de reloj en tercer estado, cosa muy útil a la hora de cumplir con la secuencia de inicialización de las tarjetas descritas en el estándar. El lector permite operar con tarjetas clase A (alimentadas a 5 Volts) y clase B (alimentadas a 3,3 Volts) haciendo uso de un jumper que permite intercambiar la tensión de alimentación suministrada a la tarjeta. Se cuenta con un zócalo para insertar la tarjeta de contacto. Por otra parte, la intefaz de usuario está compuesta por tres leds (verde, amarillo y rojo), buzzer y un display LCD16x2 donde son desplegados los mensajes que indican al usuario la operación que se efectúa sobre su tarjeta mifare. El último elemento

a describir aquí es un conector receptáculo 5x2 (100mils) en el que se conecta el módulo lector/escritor RFID que opera con las tarjetas RFID mifare.

#### **4.3.4. Lector/Escritor RFID**

Este módulo es el encargado de la comunicación con las tarjetas RFID que cumplen con la norma ISO14443[iso]. Consta básicamente de 4 secciones entre las que se encuentran: el integrado CL RC632[pdf]; el filtro EMC, el circuito de adaptación de impedancia (matching); y el inductor de la antena. El ASIC CL RC632 permite, por un lado la comunicación digital con un microprocesador a través de su puerto de datos y por el otro lado la transmisión de datos hacia la antena que emitirá la señal RF para la comunicación con las tarjetas ISO14443. Lo que llamamos propiamente antena RF está conformada por el circuito de adaptación de impedancia (matching) y por el inductor, que propaga el campo magnético para lograr el acoplamiento necesario entre lector y tarjeta, de aquí la sigla PCD (Proximity Coupling Device).

Los principios básicos de funcionamiento de la antena se detallan en el anexo [\*].

### **4.4. Funcionamiento de módulos**

#### **4.4.1. SBC**

La SBC está formada por un microcontrolador y memoria suficiente para ejecutar un sistema operativo linux orientado a desarrollar sistemas embebidos. Sobre el sistema operativo se instalan los módulos y librerías necesarias para hacer uso del hardware que contiene la SBC. En la aplicación se utilizará uno de sus puertos SPI para la comunicación con el lector/escritor de tarjetas RF, un puerto UART para la comunicación de datos con el lector de tarjetas de contacto y varias salidas GPIO para el control de la interfaz de usuario.

#### **4.4.2. VLT - Conversor de Voltajes**

El corazón de esta placa son los integrados TXB0108[pdf] que permiten la interconexión de dispositivos que operan en distintos niveles de tensión. Básicamente el

integrado está constituido por dos puertos, puerto A y puerto B cada uno de 8 bits. El puerto A opera con la tensión de 1,8 Volts que permite ser conectado a la Beagleboard, el puerto B opera con la tensión de 3,3 Volts cuando se encuentra conectado al IC CL RC632, y de 5 Volts para los restantes periféricos. Cada I/O de un puerto es sensible a los flancos de subida o bajada, trasladando estos cambios a la I/O correspondiente del puerto opuesto. Este integrado posee también una entrada de control para poner los puertos en estado de alta impedancia. Una ventaja es que no poseen entrada de control de dirección de flujo de datos, de modo que se ahorran pines de control que no se tienen disponibles en la Beagleboard. En la figura 4.7 se puede observar como están constituidas cada una de las entradas/salidas del integrado. Otra pieza que compone esta placa es el regulador de tensión LDO implementado a partir del integrado LM1117[pdf], éste se utiliza para convertir la entrada de tensión de 5 Volts en una salida de tensión de 3,3 Volts y así poder alimentar el periférico correspondiente.

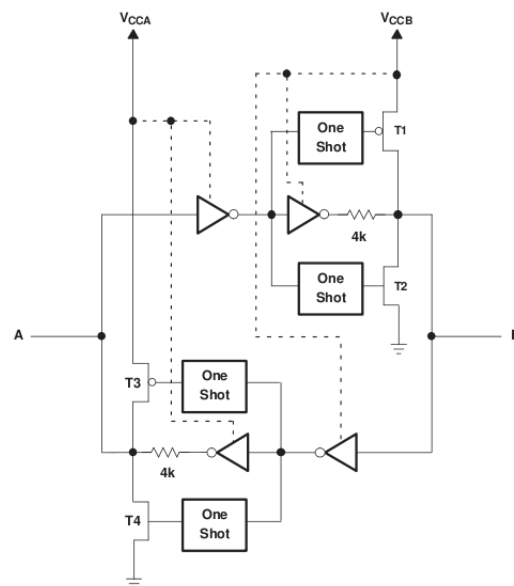


Figura 4.7: Arquitectura de una celda I/O del TXB0108

### 4.4.3. SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario

#### Lector de tarjetas de contacto ISO7816

Es un lector muy simple de implementar, su construcción se basa en un conversor full a half duplex construido a partir de un circuito transistorizado trabajando en zona de corte y saturación. Los transistores empleados son el NPN 2N3904[[pdf](#)] y el PNP 2N3906[[pdf](#)] los cuales fueron seleccionados en base a su rápida característica de conmutación que es del orden de algunas decenas de nanosegundos. Dada la característica del circuito, es posible recibir el eco de la transmisión de datos generados por la SBC. Un elemento fundamental que compone el circuito del lector es el oscilador de frecuencia 3,579545 Mhz, este valor no es antojadizo sino que permite generar la base de tiempo adecuada para la transmisión de datos entre la tarjeta y la SBC. Otras frecuencias de reloj fueron empleadas, como ser 4 Mhz y 5 Mhz, con resultados inciertos en la recepción de los datos, aún cuando sería posible usar estos valores según la referencia [Smart Cards Handbook] para los parámetros obtenidos desde el ATR de la tarjeta. El circuito cuenta también con protección de descarga ESDA6V1W5 [[pdf](#)] para los contactos de la smart card.

#### Interfaz de usuario

El elemento a destacar es un display LCD16x2 que basa su funcionamiento en el controlador Hitachi HD44780[[pdf](#)]. La transferencia de datos hacia el display se hace a través de un puerto con 4/8 bits de datos y 3 bits de control. Debido a que no se cuenta con la cantidad de pines disponibles en la Beagleboard para operar en el modo de 8 bits, se empleó en su lugar el modo 4 bits del display. El bit de control RS indica si el byte a enviar por el puerto de datos es una palabra de control o un caracter ASCII a ser almacenado en la memoria interna del display. El bit R/W por su parte indica si se efectuará una lectura o una escritura de la memoria interna del display. Por último en el bit E se indica mediante flanco de bajada que se ejecute la operación indicada con los anteriores dos bits de control, previo a este flanco las señales en el puerto de datos deben permanecer fijas. El display cuenta también con una entrada para calibrar el contraste del LCD, la calibración se realiza a partir de un divisor resistivo implementado con resistencias y un preset. El backlight del display es accionado desde uno de los pines de la SBC a partir de un circuito transistorizado que opera en zona de corte/saturación.

Los restantes elementos que componen la interfaz de usuario son leds y buzzer que son accionados directamente desde los pines del puerto de expansión de la SBC.

#### **4.4.4. Lector/Escritor RFID**

En el corazón del lector/escritor de tarjetas RFID, se encuentra el chip CL RC632 que forma parte de una familia de integrados empleados para la comunicación con tarjetas sin contacto, pertenecientes a la norma ISO14443 las cuales operan a la frecuencia 13,56 Mhz. El CL RC632 soporta todas las capas del esquema de comunicación que se establecen en la mencionada norma, incluyendo el algoritmo de seguridad (CRYPTO1) para autenticar las tarjetas Mifare Classic. En lo que sigue se describen algunas de las características principales del integrado.

##### **Interfaz**

Los comandos, bits de configuración y las banderas se acceden a través de la interfaz con un microprocesador. El puerto elegido para la comunicación desde la SBC es el SPI, aunque es posible la comunicación a través de su puerto paralelo.

##### **Registros**

La configuración del chip se lleva a cabo a partir de un mapa de registros de control que se encuentra dividido en 8 páginas con 8 registros cada una. La manera de alcanzar estos registros es mediante el intercambio de página, mecanismo que puede ser deshabilitado mediante escritura de un “1” en el bit 7 del registro 0 en la página 0, logrando direccionamiento plano. La función de cada uno de sus registros puede ser observada en la hoja de datos del integrado [RC632.pdf].

##### **Memoria EEPROM**

La memoria está dividida en 32 bloques con 16 bytes cada bloque. El contenido de memoria EEPROM en los bloques 1 y 2 (dirección 10hex a 2Fhex) se utilizan para configurar los registros del CL RC632 durante la fase de inicialización, de forma automática. La configuración por defecto soporta la comunicación MIFARE ISO 14443 A, aunque los usuarios pueden especificar la inicialización para I-Code1, ISO 15693 o ISO 14443 B, mediante los bloques de memoria 3 al 7. Se reservan 384 bytes para almacenar las claves CRYPTO1 que son usadas para la autenticación con las tarjetas. El

formato de una de estas claves puede verse en [RC632.pdf] y tiene una longitud de 12 bytes, por tanto es posible almacenar en memoria las 32 claves que posee una tarjeta.

### **Buffer FIFO**

El integrado contiene un buffer FIFO de 64 bytes para flujo de datos con un microprocesador. La entrada y salida del buffer de datos está conectado con el registro FIFOData. Escribir en este registro almacena un byte en el buffer e incrementa el puntero de escritura del buffer. La lectura de este registro muestra el contenido del buffer e incrementa el puntero de lectura. La distancia entre el puntero de escritura y lectura se puede obtener mediante la lectura del registro FIFOLength, indicando así la cantidad de bytes que se llevan almacenados. Es posible observar y controlar el estado del buffer mediante varios registros, para evitar que se produzcan errores de comunicación con el microprocesador.

### **Interrupciones**

El CL RC632 indica ciertos eventos estableciendo el bit IRQ en el registro Primary-Status, y además, por la activación del pin IRQ. La señal en el pin IRQ se puede utilizar para interrumpir un microprocesador. Las posibles fuentes de interrupción son:

- Timer, a través de su bandera TimerIRQ
- Transmisor, coprocesador CRC y memoria E2PROM, a través de su bandera TxIRQ
- Receptor, a través de su bandera RxIRQ
- Registro de comando, a través de su bandera IdleIRQ
- Buffer FIFO, a través de sus banderas HiAlertIRQ y LoAlertIRQ

El CL RC632 informa al microprocesador sobre el origen de una interrupción mediante el establecimiento del bit adecuado en el registro InterruptRq. La relevancia de cada bit de petición de interrupción como fuente de una interrupción puede ser enmascarada con el bit de habilitación de interrupciones en el registro InterruptEn. Si alguna bandera de solicitud de interrupción se establece en 1 (una solicitud de interrupción está pendiente) y la correspondiente bandera de habilitación de interrupción está en "1", la bandera de estado IRQ en el registro PrimaryStatus se establece en 1. Por otra parte

diferentes fuentes de interrupción pueden estar activas al mismo tiempo. Por lo tanto, se hace un OR con todos los bits de solicitud de interrupción, el resultado se envía a la bandera IRq y se conecta al pin IRQ. Los bits de petición de interrupciones están seteados de forma automática por las máquinas de estado internas del CL RC632. Adicionalmente, el microprocesador tiene acceso para setearlos o borrarlos. Una implementación especial de los registros InterruptRQ y InterruptEn permiten el cambio de un único bit de estado sin tocar el resto.

**Configuración del Pin IRQ:** El nivel lógico de la bandera de estado IRq es visible por el pin IRQ. Además, la señal en el pin puede ser controlada por los siguientes bits del registro IRQPinConfig

- **IRQInv:** Si este bit es 0, la señal en el pin IRQ es igual al nivel lógico del bit IRq. Si es 1, la señal en el pin IRQ está invertida con respecto al bit IRq.
- **IRQPushPull:** Si este bit es 1, el pin IRQ tiene características de una salida estándar CMOS, de otra manera la salida es open drain y un resistor externo es necesario para alcanzar un nivel alto en este pin.

Para poder hacer uso de lo descrito anteriormente se previó y reservó una entrada en el conector de expansión de la Beagleboard (ver esquemáticos), sin embargo el software empleado no hace uso del mecanismo de interrupciones sino que opera mediante polling.

### **Transmisor, pines Tx1 y Tx2**

La señal en Tx1 y Tx2 es la portadora, centrada en 13,56 Mhz, modulada ASK 100 % con los datos a transmitir. Estos pines son conectados directamente a la antena para propagar la señal RF hacia las tarjetas RFID. La distancia de operación alcanzada es de hasta 10cm de longitud, dependiendo de la geometría de la antena, así como también adaptación de impedancia lograda, entre otros [App Notes]. Algunos registros del integrado permiten la configuración del transmisor, posibilitando entre otras cosas apagar la señal portadora en caso de ser necesario.

### **Conjunto de comandos**

El CL RC632 opera como una máquina de estado capaz de interpretar y ejecutar un conjunto de comandos pre establecidos. La ejecución de uno de ellos es posible escribiendo su código correspondiente en el “Registro de Comandos”, si fuera necesario



el pasaje de parámetros, éstos se colocarán en el buffer FIFO mencionado antes. Una lista detallada de comandos junto con los parámetros necesarios es mostrada en la hoja de datos, entre ellos podemos destacar los siguientes: Authent, Transceive , LoadKey.

### **Antena RF**

En lo que sigue se describen algunas de las partes que integran la antena RF que se conecta directamente a los pines Tx1 y Tx2 del integrado descrito antes.

### **Filtro EMC**

La frecuencia de la portadora de la señal transmitida se centra en 13,56 Mhz, sin embargo se generan también armónicos de mayor frecuencia. Para cumplir con la regulación internacional EMC es que se agrega este filtro pasa bajos, cuya frecuencia de corte debe ubicarse en 14,4 Mhz, o sea 13,56 Mhz más 847,5 Khz para permitir el ancho de banda necesario que logre el baud rate requerido en la transmisión de los bits. En síntesis el filtro ayuda a mejorar la relación señal a ruido para la señal recibida y decrementa el sobretiro en los pulsos transmitidos mejorando la calidad de la señal transmitida. Los valores propuestos para los componentes de este filtro se encuentran en las notas de aplicación [app notes.pdf]

### **Matching**

Por su parte el circuito de adaptación de impedancia permite que la antena resuene a la frecuencia deseada, en este caso 13,56 Mhz. Los valores de los elementos que conforman este circuito deben ser estimados y sintonizados a partir del diseño del inductor de la antena. El factor de calidad total de la antena debe ser tenido en cuenta para cumplir con los requerimientos establecidos en la norma ISO14443. El mecanismo para el cálculo de los elementos que forman este circuito se detallan en las notas de aplicación [app notes.pdf].

### **Inductor**

El inductor de la antena es quien propaga el campo magnético para la transmisión de datos hacia las tarjetas. El diseño de la antena comienza a partir de este elemento. El cálculo detallado del valor del inductor se encuentra en las notas de aplicación [microchip.pdf], aunque su costo y tiempo en la práctica son considerables; una estimación

del valor de la inductancia puede verse en el [anexo], en el que se deben tener en cuenta los siguientes elementos: geometría de la antena, ancho y espesor del conductor del PCB, longitud de una espira, número de vueltas, etc.

### **Receptor**

El circuito receptor de la antena se encuentra bien detallado en las notas de aplicación [app notes.pdf] y no fue necesario efectuar ningún cambio para lograr buenos resultados en este diseño particular.

## Capítulo 5

# Documentos y esquemáticos del hardware

### 5.1. Herramientas de diseño

Las herramientas CAD utilizadas para el diseño del hardware son Kicad[ref] y gEDA[ref], ambas son de uso libre y open source. Para el caso del lector/escritor RFID se empleó la aplicación gEDA, ya que permite generar pistas con forma de arco de circunferencia, elemento necesario para formar el inductor de la antena. El resto del hardware se diseñó en Kicad, dado que tiene una interfaz gráfica más amigable que gEDA lo que la hace más sencilla de usar. Ambas aplicaciones tienen la ventaja de permitir agregar y editar componentes o módulos diseñados por el mismo usuario y permiten generar archivos en formato gerber necesarios para enviar al fabricante de circuitos impresos.

### 5.2. Esquemáticos y componentes

En lo que sigue se muestran una serie de cuadros y esquemáticos para lograr un mayor detalle del diseño de las distintas partes que conforman el hardware del prototipo  $RF^2$ . En el cuadro 5.1 se observa la distribución de pines asociada con el conector que une la SBC (Beagleboard), con el conversor de niveles de tensión, VLT. Por su parte el cuadro 5.2 muestra el orden de los pines en el conector que interconecta la placa de circuito impreso, VLT, con la placa de circuito impreso, SCUI, que contiene el resto del

hardware.

| Función            | Nombre   | Nº de pin | Nº de pin | Nombre  | Función            |
|--------------------|----------|-----------|-----------|---------|--------------------|
| Fuente 1,8 Volts   | 1V8      | 1         | 2         | 5V      | Fuente 5 Volts     |
| Led Verde          | GPIO     | 3         | 4         | GPIO    | RST_SC             |
| Led Rojo           | GPIO     | 5         | 6         | UART_TX | UART_TX            |
| XOE                | GPIO     | 7         | 8         | UART_RX | UART_RX            |
| D7                 | GPIO     | 9         | 10        | GPIO    | Led Amarillo       |
| SPI_CS             | SPI_CS   | 11        | 12        | GPIO    | Buzzer             |
| D5                 | GPIO     | 13        | 14        | GPIO    | BacK Light         |
| E                  | GPIO     | 15        | 16        | GPIO    | D6                 |
| SPI_SOMI           | SPI_SOMI | 17        | 18        | GPIO    | D4                 |
| SPI_SIMO           | SPI_SIMO | 19        | 20        | GPIO    | RW                 |
| SPI_CLK            | SPI_CLK  | 21        | 22        | GPIO    | RS                 |
| IRQ_RF             | GPIO     | 23        | 24        | GPIO    | RST_RF             |
| OE                 | REGEN    | 25        | 26        | nRESET  | N.C.               |
| Referencia 0 Volts | GND      | 27        | 28        | GND     | Referencia 0 Volts |

Cuadro 5.1: Conector 14x2 Beagleboard – VLT

| Función            | Nombre | Nº de pin | Nº de pin | Nombre   | Función           |
|--------------------|--------|-----------|-----------|----------|-------------------|
| Referencia 0 Volts | GND    | 1         | 2         | N/C      | RFU               |
| Fuente 3,3 Volts   | 3V3    | 3         | 4         | RST_RF   | Reset RC632       |
| RFU                | N/C    | 5         | 6         | SPI_SOMI | SPI para RC632    |
| RFU                | N/C    | 7         | 8         | SPI_CLK  | Reloj SPI         |
| RFU                | N/C    | 9         | 10        | SPI_SIMO | SPI para RC632    |
| RFU                | N/C    | 11        | 12        | SPI_CS   | Chip Select RC632 |
| Control LCD16x2    | RS     | 13        | 14        | IRQ_RF   | Interrup RC632    |
| Control LCD16x2    | RW     | 15        | 16        | BLK      | BacK Light        |
| Control LCD16x2    | E      | 17        | 18        | XOE      | Reset oscilador   |
| Dato LCD16x2       | D4     | 19        | 20        | BUZZ     | Buzzer            |

|                    |       |    |    |         |                  |
|--------------------|-------|----|----|---------|------------------|
| Dato LCD16x2       | D5    | 21 | 22 | N/C     | RFU              |
| Dato LCD16x2       | D6    | 23 | 24 | N/C     | RFU              |
| Dato LCD16x2       | D7    | 25 | 26 | N/C     | RFU              |
| RFU                | N/C   | 27 | 28 | UART_RX | Smart card       |
| Fuente 5 Volts     | 5V    | 29 | 30 | UART_TX | Smart card       |
| Referencia 0 Volts | GND   | 31 | 32 | RST_SC  | Reset Smart card |
| Led Rojo           | LED_R | 33 | 34 | N/C     | RFU              |
| Led Amarillo       | LED_A | 35 | 36 | N/C     | RFU              |
| Led Verde          | LED_V | 37 | 38 | N/C     | RFU              |
| RFU                | N/C   | 39 | 40 | N/C     | RFU              |

Cuadro 5.2: Conector 20x2 VLT - SCUI

### 5.2.1. SBC

| Componente                 | Descripción                     |
|----------------------------|---------------------------------|
| SBC                        | Beagleboard RevC4               |
| Memoria SD                 | 4GB SDHC Class 6 SD Card        |
| Cable serial DB9 nulo      | DB9F Null Modem (RS-232) (6-ft) |
| Cable conversor usb–serial | USB to DB9M RS-232 (PL-2302)    |
| Cable USB                  | USB Mini-A to USB A Female, OTG |
| Cable USB                  | USB Mini-B Male to USB A Male   |
| Fuente                     | 5VDC/2,5A                       |

Cuadro 5.3: SBC y lista de accesorios

### 5.2.2. VLT - Conversor de Voltajes

| Componente | Descripción                  | Footprint      | Valor       |
|------------|------------------------------|----------------|-------------|
| C1         | Polarized Capacitor (Tantal) | 6032[2312]     | 10uF, 25V   |
| C2         | Polarized Capacitor (Tantal) | 6032[2312]     | 100uF, 6V3  |
| U4         | Regulador LM1117-3.3         | SOT-223        | 3.3V, 800mA |
| U1, U2, U3 | Voltage Level Translator     | TSSOP20        | -           |
| P1         | RECEPTACLE, 28WAY, 2ROW      | SMD Pitch 2,54 | 28 pines    |
| P2         | RECEPTACLE, 40WAY, 2ROW      | SMD Pitch 2,54 | 40 pines    |
| P1b        | HEADER, 28WAY, 2ROW          | T H Pitch 2,54 | 28 pines    |
| P2b        | HEADER, 40WAY, 2ROW          | T H Pitch 2,54 | 40 pines    |

Cuadro 5.4: Lista de componentes de la placa de circuito impreso VLT

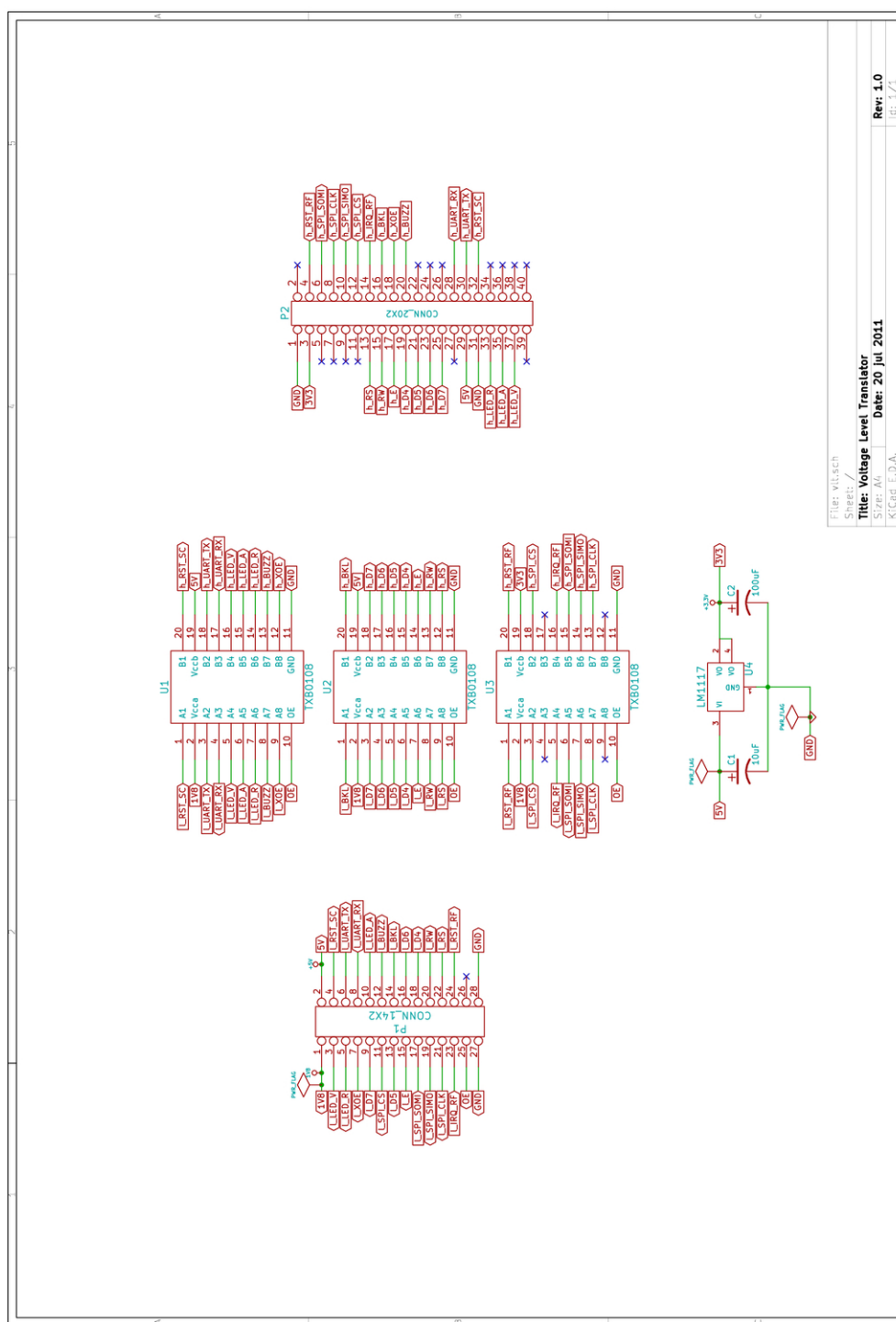


Figura 5.1: Esquemático de la placa VLT - Voltage Level Translator

**5.2.3. SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario**

| Componente    | Descripción             | Footprint      | Valor          |
|---------------|-------------------------|----------------|----------------|
| R9            | Resistor 100W 1/4W 1 %  | 3216[1206]     | 100W 1/4W 1 %  |
| R10, R13      | Resistor 100KW 1/4W 5 % | 3216[1206]     | 100KW 1/4W 5 % |
| R11, R12, R14 | Resistor 10KW 1/4W 5 %  | 3216[1206]     | 10KW 1/4W 5 %  |
| Q2            | TRANSISTOR, NPN, 300MHZ | SOT23          | MMBT3904       |
| Q3            | TRANSISTOR, PNP, 250MHZ | SOT23          | MMBT3906       |
| J2            | SIM socket (6 contacts) | SMD            | -              |
| JP3, JP4      | HEADER, 1ROW, 3WAY      | T H Pitch 2,54 | 3 pines        |
| X1            | Oscillator 3.579545MHz  | SMD            | 3.579545 Mhz   |
| ESD1          | Anti ESD                | SOT323         | 6V / 150W      |

Cuadro 5.5: Lista de componentes del lector de tarjetas de contacto, SC



| Componente | Descripción               | Footprint      | Valor           |
|------------|---------------------------|----------------|-----------------|
| R1         | Resistor 4K7 1/10W 1 %    | 1608[0603]     | 4,7KW 1/10W 1 % |
| R2, R8     | Resistor 3R3 1/10W 1 %    | 1608[0603]     | 3,3W 1/10W 1 %  |
| R3, R4, R5 | Resistor 680R 1/10W 1 %   | 1609[0603]     | 680W 1/10W 1 %  |
| R6, R7     | Resistor 10K 1/10W 1 %    | 1608[0603]     | 10KW 1/10W 1 %  |
| RV1        | Preset 15K 1/10W 25 %     | SMD            | 15KW 1/10W 25 % |
| Q1         | TRANSISTOR, NPN, 300MHZ   | SOT23          | MMBT3904        |
| S1         | LCD MODULE 16X2 CHARACTER | Pitch 2,54     | -               |
| CONN1      | HEADER FEMALE 16POS.1”TIN | Through Hole   | 16 pines        |
| CONN2      | HEADER, 1ROW, 16WAY       | T H Pitch 2,54 | 16 pines        |
| LED1       | Led green 5mm             | Through Hole   | 1,9V, 2mA       |
| LED2       | Led red 5mm               | Through Hole   | 1,9V, 2mA       |
| LED3       | Led yellow 5mm            | Through Hole   | 2,4V, 2mA       |
| BUZZ1      | Buzzer                    | Through Hole   | 3 20Vdc, 3 16mA |

Cuadro 5.6: Lista de componentes para la interfaz de usuario,  
LCD

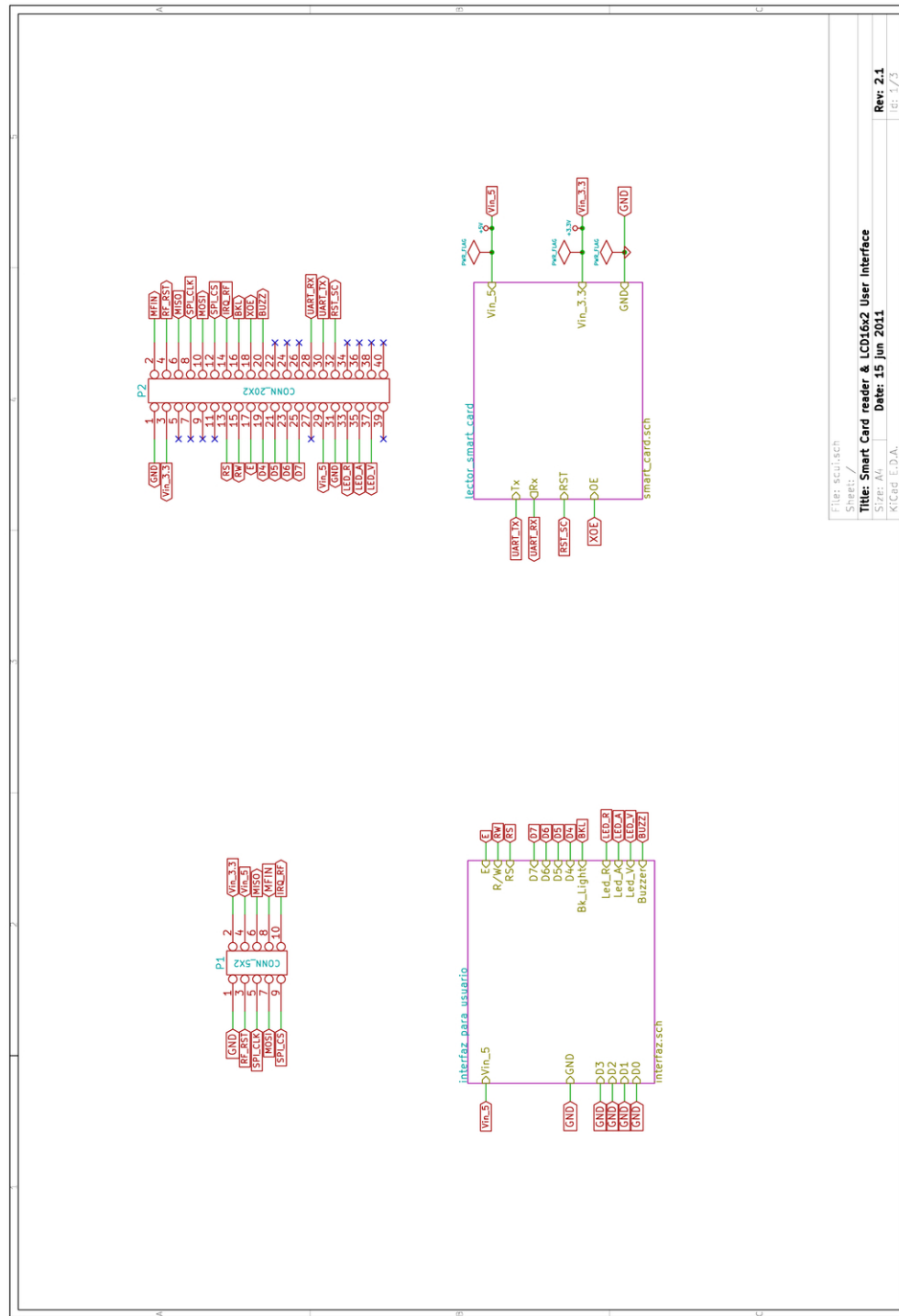


Figura 5.2: Esquemático de la placa SCUI

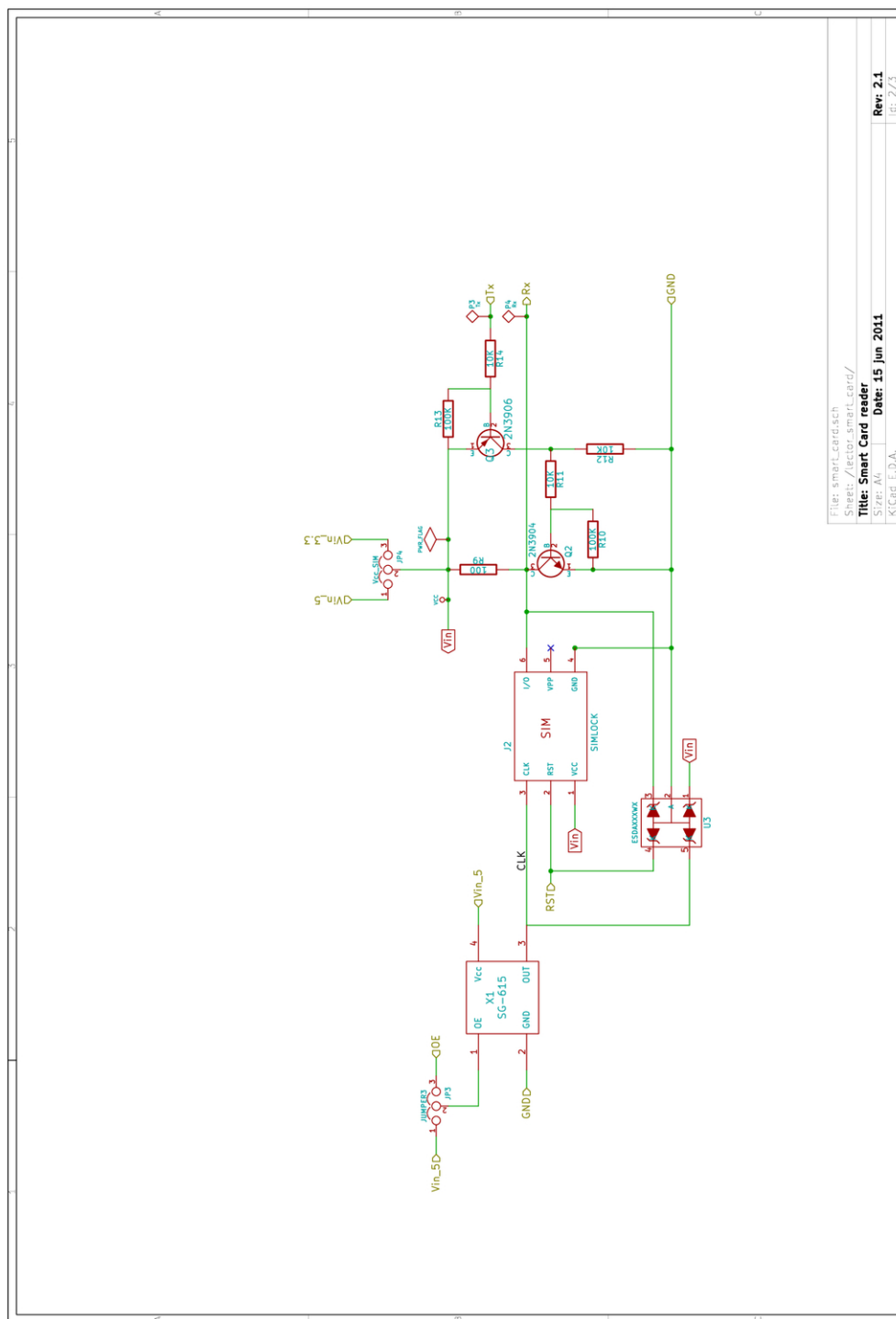


Figura 5.3: Esquemático del lector de tarjetas de contacto, incluido en la placa SCUI



#### 5.2.4. Lector/Escritor RFID

| Componente     | Descripción | Footprint  | Valor                   |
|----------------|-------------|------------|-------------------------|
| C1, C2         | Capacitor   | 1608[0603] | 10pF, Ceramic NPO, 2 %  |
| C3, C4         | Capacitor   | 1609[0603] | 100pF, Ceramic NPO, 2 % |
| C5, C6, C7, C8 | Capacitor   | 1608[0603] | NC                      |
| R1, R2         | Resistor    | 1608[0603] | 0W, 1/10W, 1 %          |

Cuadro 5.7: Lista de componentes de la antena RF, Inductor  
+ Adaptación de impedancia

| Componente               | Descripción                             | Footprint  | Valor                    |
|--------------------------|---|------------|--------------------------|
| C10                      | Capacitor                               | 1610[0603] | 10pF, Ceramic NPO, 2 %   |
| C1, C2                   | Capacitor                               | 1608[0603] | 15pF, Ceramic NPO, 5 %   |
| C12, C13                 | Capacitor                               | 1608[0603] | 56pF, Ceramic NPO, 2 %   |
| C14, C15                 | Capacitor                               | 1608[0603] | 68pF, Ceramic NPO, 1 %   |
| C9                       | Capacitor                               | 1609[0603] | 100pF, Ceramic NPO, 2 %  |
| C16                      | Capacitor                               | 1608[0603] | 1nF, Ceramic NPO, 10 %   |
| C4, C5, C7, C8, C11, C17 | Capacitor                               | 1608[0603] | 100nF, Ceramic X7R, 10 % |
| C3, C6, C18              | Capacitor                               | 1608[0603] | 10uF, Ceramic X5R, 20 %  |
| L1, L2, L3, L6           | Inductor                                | 2012[0805] | 22nH, 700mA, 5 %         |
| L4, L5                   | Inductor                                | 3225[1210] | 1uH, 400mA, 5 %          |
| R3                       | Resistor                                | 1608[0603] | 50W, 1/10W 1 %           |
| R2                       | Resistor                                | 1608[0603] | 820W, 1/10W 5 %          |
| R1                       | Resistor                                | 1608[0603] | 2,2KW, 1/5W 1 %          |
| U1                       | Reader<br>ISO14443                      | SO32       | CL RC632                 |
| U2                       | Crystal Oscil-<br>lator, HC49 US<br>SMD | 49USMXL    | 13.56MHz, 10pF           |

|              |                                    |                |          |
|--------------|------------------------------------|----------------|----------|
| U3           | Operational Amplifier (up to 7.5V) | SOT23-5        | OPA354   |
| CONN1, CONN2 | U.FL-R Connector                   | U.FL-R-SMT     | -        |
| J1           | HEADER, 10WAY, 2ROW                | T H Pitch 2,54 | 10 pines |
| J1b          | RECEPTACLE, 10WAY, 2ROW            | SMD Pitch 2,54 | 10 pines |

Cuadro 5.8: Lista de componentes del lector/escritor RFID, sin la antena RF

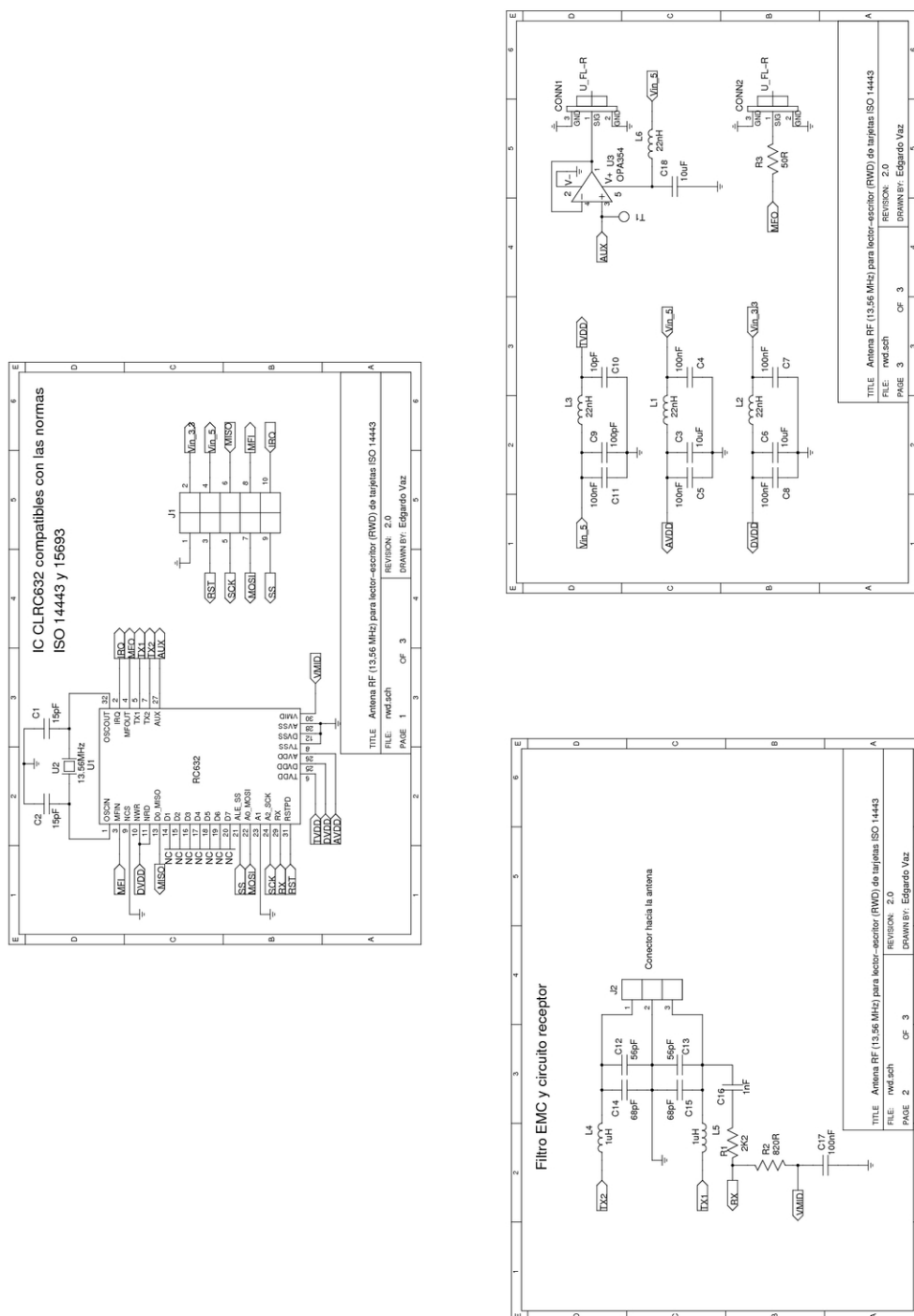


Figura 5.5: Esquemático del módulo digital del lector/escritor RFID

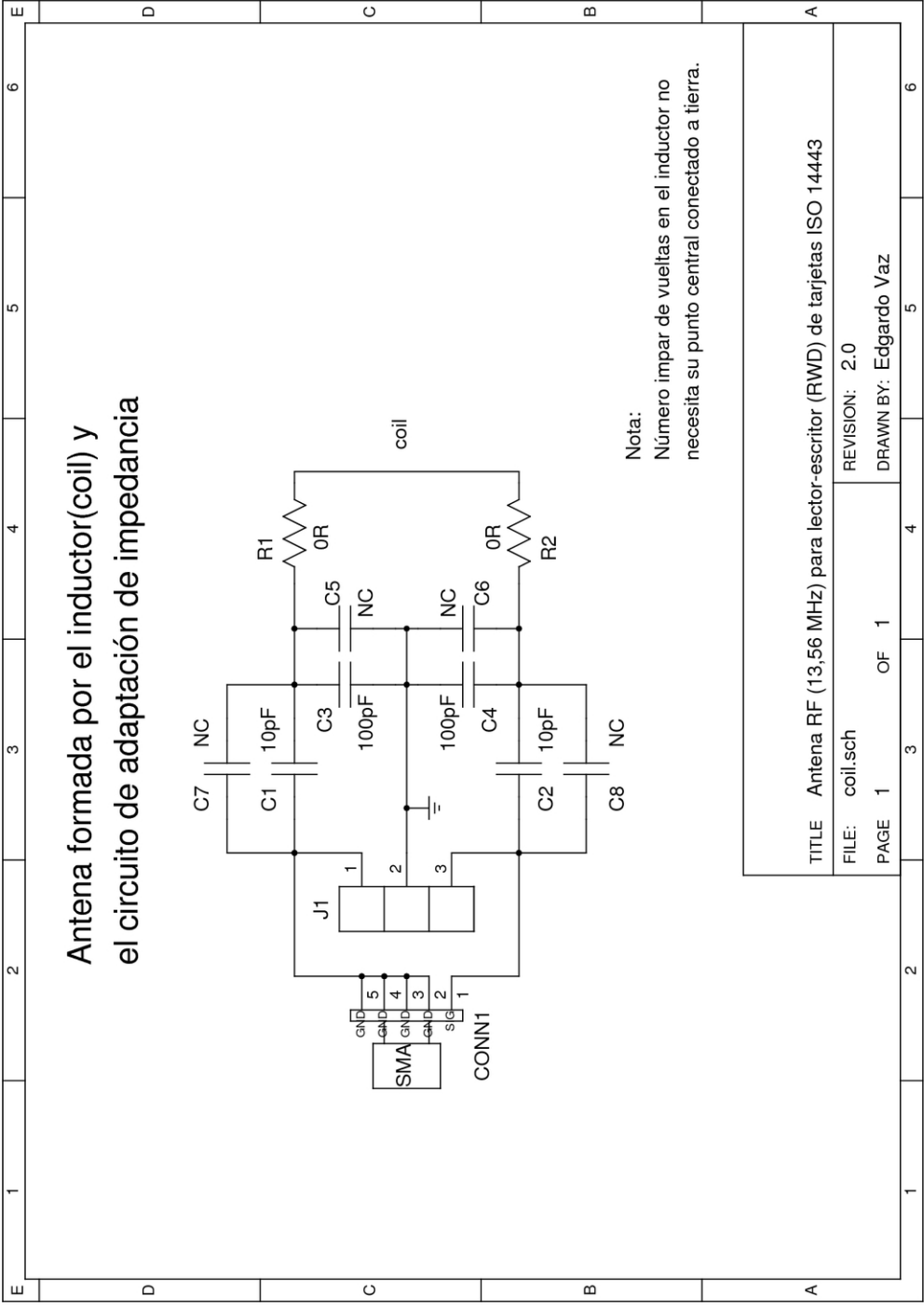


Figura 5.6: Esquemático de la antena RFID, Inductor + Adaptación de impedancia



# Capítulo 6

## Software

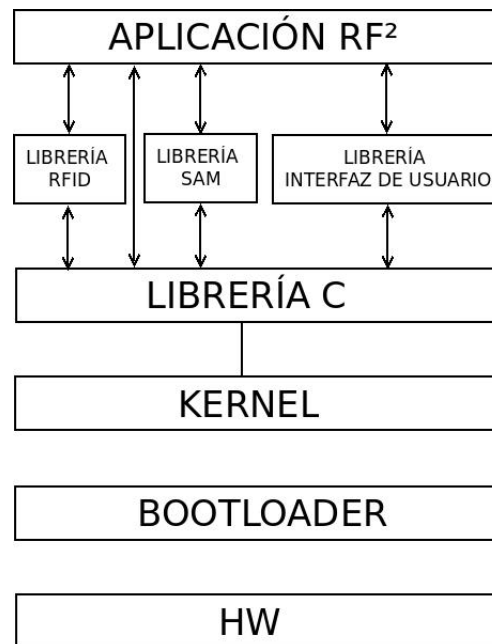
### 6.1. Introducción

Se debe destacar que todo el desarrollo de software se basa exclusivamente en herramientas de software libre. La distribución Linux elegida para el sistema embebido se llama Angström. Ésta distribución es muy usada en aplicaciones que usan una Beagle-board y cuenta con una gran cantidad de librerías implementadas en lenguaje C, que permiten una gran escalabilidad a la hora de incorporar nuevos periféricos en la aplicación.

### 6.2. Arquitectura de Software

#### 6.2.1. Descripción

Un sistema linux en general se compone de diferentes partes que interactúan entre sí, formando capas ordenadas con distintos grados de abstracción respecto al hardware. Esto lo podemos apreciar en la (FIGURA) donde se muestra a grandes rasgos el sistema implementado.

Figura 6.1: Sistema  $RF^2$ 

El bootloader es la parte del sistema más primitiva y su función es la de cargar el kernel en memoria RAM para su ejecución. En general el bootloader se divide en dos etapas, la primera etapa del bootloader se encarga de buscar la segunda etapa del bootloader en particiones activas para luego cargarlo en RAM y ejecutarlo. La segunda etapa del bootloader se encarga de cargar una imagen comprimida del kernel en RAM y ejecutarlo. En este momento se descomprime el kernel y se cede el control al kernel. El kernel se encarga a grandes rasgos de habilitar interrupciones, configurar la memoria y montar un sistema de archivos primitivo que permite a su vez cargar los módulos necesarios para la interfaz con periféricos. Luego se monta el verdadero sistema de archivos (fileSystem). En este nuevo sistema de archivos es donde se instalarán diferentes programas y librerías para una correcta ejecución de nuestra aplicación. En funcionamiento toda la comunicación con periféricos se realiza a través del kernel que es la parte más cercana al hardware. Cada vez que ejecutamos una aplicación, esta hace uso de las librerías para poder comunicarse con el kernel, y éste se encarga de la comunicación con los periféricos. Las librerías pueden ser nativas como es el caso de la librería de lenguaje C o desarrolladas para que nuestra aplicación funcione correctamente.

### 6.2.2. Sistema Operativo

La beagleboard al arrancar tiene la posibilidad de buscar el bootloader en NAND o en dispositivos extraíbles tales como memorias USB o memorias SD, lo mismo sucede con el kernel. Para nuestro sistema, elegimos un arranque a través de una memoria SD ya que es más fácil de manipular.

En la siguiente FIGURA se puede ver como queda compuesta la SD.

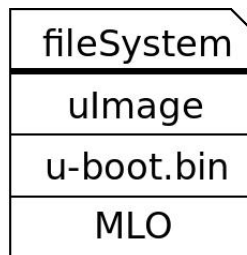


Figura 6.2: Memoria SD

En la FIGURA se pueden distinguir dos particiones, una en formato FAT32 y otra en formato ext3. La partición con FAT32 es la partición de arranque en donde se encuentra el bootloader (MLO, u-boot.bin) y el kernel (uImage). La partición con ext3 es la partición donde se encuentra el sistema de archivos (fileSystem).

El MLO es el equivalente bootloader de la primera etapa; en general ya viene precargado en la memoria NAND de la beagleboard. Es posible generarlo o incluso bajar una versión ya compilada desde la web de Angström. Como característica principal tiene la capacidad de buscar el u-boot.bin en dispositivos extraíbles como memorias SD o USB.

El u-boot.bin es el equivalente al de la segunda etapa. Al igual que el MLO, es posible generarlo o incluso bajarlo de la web de Angström. En nuestro sistema fue necesario generarlo ya que configura el bloque de expansión de la beagleboard.

El uImage es el kernel del sistema. Fue necesario generarlo ya que se debieron modificar sus fuentes para que queden habilitadas las interfaces de comunicación con los dispositivos periféricos.

El fileSystem es el correspondiente a una distribución linux llamada Angström. Se pueden llegar a precargar distintos programas y librerías dependiendo de la forma en que lo generemos. Angström es una distribución linux diseñada específicamente para

sistemas embebidos en microprocesadores como el nuestro. Esto lo hace más eficiente que otros sistemas operativos. La elección de esta distribución se debió a que es de los más recomendados y utilizados en la documentación y foros de Beagleboard.

### **6.2.3. Librerías**

## **6.3. Herramientas utilizadas en el desarrollo del sistema**

### **6.3.1. Introducción**

Para el desarrollo de sistemas, existe una gran variedad de herramientas útiles, algunas de software libre y otras privativas. El hecho de tener tantas opciones disponibles dificulta la elección de las herramientas.

Para la elección de las herramientas tomamos como primer criterio de decisión el hecho de que sean libres y nos basamos en las experiencias de otras personas que ya han transitado caminos comunes, consultando y participando en foros activos.

A continuación se detallan las herramientas utilizadas para el desarrollo del sistema. Primero se da una descripción de las herramientas elegidas y luego EN se comentan otras que se probaron con igual o peor resultado que las herramientas elegidas en última instancia.

### **6.3.2. Generación de MLO, u-boot.bin y uImage**

El MLO no fue necesario generarlo debido a su simpleza, ya que el binario precompilado realiza bien su función.

El u-boot.bin y el uImage fueron generados con la herramienta de desarrollo y compilación OpenEmbedded-Bitbake que es una fusión de dos herramientas: OpenEmbedded herramienta para construcción y mantenimiento de distribuciones y Bitbake herramienta de compilación similar al Make que automatiza la construcción de ejecutables entre otros. OpenEmbedded utiliza Bitbake para su objetivo. Es una herramienta muy potente y difícil de aprender al principio, luego de entendido su principio de funcionamiento se hace muy simple su utilización. Es necesaria una buena conexión a internet para su utilización. Con esta herramienta también se pueden generar el MLO y el

filesystem, aunque preferimos utilizar otras herramientas por sobre ésta. Su instalación, configuración, estructura y uso se pueden ver en el ANEXO.

### **6.3.3. Generación de FS**

Para la generación del fileSystem de Angström, se utilizó la herramienta web Narcissus. Esta herramienta permite seleccionar entre diferentes dispositivos entre los cuales está beagleboard, los programas que se quieran instalar, el formato de la imagen seleccionada e incluso se puede generar un kit de desarrollo (SDK) para el host. Debido a la facilidad de uso y a los buenos resultados obtenidos, se decidió utilizar esta opción por sobre la del filesystem generado por la herramienta OpenEmbedded-Bitbake.

### **6.3.4. Croscompilación**

Para la croscompilación se utilizó el SDK generado por Narcissus y la herramienta Make para generar los archivos necesarios. La instalación el SDK se encuentra en el ANEXO.

### **6.3.5. Depuración de código**

### **6.3.6. Librerías**

## **6.4. Desarrollo**

### **6.4.1. MLO**

### **6.4.2. Multiplexado de pines**

El microprocesador OMAP3530 tiene muchos pines con distintas interfaces, pero no todas las señales son acccesibles desde la BeagleBoard. Para poder acceder a las señales del microprocesador existe en la BeagleBoard un bloque de expansión de 28 pines. (dicho arriba)

Por defecto en el bloque de expansión no se encuentran las señales que nosotros queremos. Esto lleva a que se tenga que modificar el estado inicial de los pines. Existen dos

formas de modificar los pines de modo que tengamos las señales que precisamos. Una de ellas es modificar el u-boot.bin, la otra es modificar el uImage (kernel). Cualquiera de estas modificaciones implica una compilación de los fuentes asociados al archivo en cuestión.

Para la modificación de las señales disponibles en el bloque de expansión se decidió modificar el u-boot ya que la modificación por u-boot es más intuitiva y por experiencia sabemos que lo que más se actualiza y/o modifica es el kernel.

### 6.4.3. u-boot

Como se mencionó anteriormente en el u-boot se realiza la configuración de los pines del bloque de expansión de la Beagleboard. “hacer referencia a tabla en algún lado” Cada pin del bloque de expansión tiene varias funcionalidades asociadas, y la configuración de una funcionalidad depende de un multiplexado modificable a nivel de software. Esto es, dependiendo del “modo de pin” elegido, la señal que se obtiene en el pin. Para que los cambios hechos en el u-boot tengan el efecto esperado al arrancar el sistema, es necesario que en la configuración del kernel esté la opción CONFIG\_OMAP\_MUX = no, ya que deshabilita posibles cambios en la configuración de los pines durante la carga del kernel. Esta opción no está activada por defecto en ninguna versión actual del kernel.

Antes de modificar el estado de los pines del bloque de expansión es necesario obtener los fuentes del u-boot.

Nota: Puede que cuando se realiza la instalación de OpenEmbedded-Bitbake (anexo), se genere un directorio relacionado con u-boot en /stuff/build/tmp/work/beagleboard-angstrom-linux-gnueabi/, si esto es así, no es necesario volver a obtener los fuentes.

Primero configuramos bitbake para poder utilizarlo:

```
$ export BBPATH=/stuff/build:/stuff/openembedded
```

```
$ export PATH=/stuff/bitbake/bin:$PATH
```

Obtenemos los fuentes:

```
$ cd /stuff/build
```

```
$ bitbake -f -c clean -b ../openembedded/recipes/u-boot/u-boot_git.bb
```

```
$ bitbake -f -c compile -b ../openembedded/recipes/u-boot/u-boot_git.bb
```

Los fuentes se encuentran en

`/stuff/build/tmp/work/beagleboard-angstrom-linux-gnueabi/u-boot.../git/`.

En los fuentes del u-boot dentro de `board/ti/beagle/` se encuentra el archivo `beagle.h` que es donde se establece la configuración de los pines del bloque de expansión de la beagleboard.

Si abrimos este archivo vamos a ver líneas del estilo: `MUX_VAL(CP(MCBSP3_DX), (IEN — PTD — DIS — M4)) /*GPIO_140*/`

`MUX_VAL` indica que se va a modificar el valor de multiplexado de lo que está entre paréntesis. `CP(MCBSP3_DX)` es el `Control.PadConf`, esto es el registro del microprocesador asociado con el pin a modificar. `(IEN — PTD — DIS — M4)` esta es la configuración del pin en cuestión:

La opción `IEN` (input enable) hace que el pin sea bidireccional. La opción `PTD` y `PTU`, indica si el pin tiene un pull down o pull up respectivamente. La opción `DIS` y `EN`, indica si se deshabilitan o no las opciones `PTD` y `PTU`. La opción `M4` es el modo seleccionado para del pin. Para la beagleboard existen 4 modos: `M1`, `M2`, `M3` y `M4`. `GPIO_140` es el nombre de la señal (ver que solo es un comentario).

El `Control.PadConf` es un registro de 32bits el cual controla el estado de dos pines, esto es, la parte baja del registro controla un pin y la parte alta controla otro.

Analizando el “manual de referencia BeagleBoard del usuario” (“Expansion connector signals” – tabla 20), “manual técnico de referencia OMAP35x” (“SCM functional description” – capítulo 7.4) y agregando las opciones que nos interesan para los pines, se obtuvo la siguiente tabla:

Al modificar el archivo `beagle.h` hay que tener mucho cuidado ya que al sustituir los valores no se deben repetir pines ni registros, no deben haber incoherencias, un registro por cada pin y un pin por cada registro. Dentro del archivo hay un macro definido `MUX_BEAGLE_C()`, donde se deben realizar las modificaciones ya que nuestro modelo de beagleboard es `C4` y éste macro es el utilizado para este modelo de beagleboard. En una primera instancia se sustituyeron los valores de la TABLA buscando los equivalentes del `PadConf` en el `beagle.h`.

```
#define MUX_BEAGLE_C()
```

```
MUX_VAL(CP(MCBSP3_DX), (IEN — PTD — DIS — M4)) /*GPIO_140*/
```

```
MUX_VAL(CP(MCBSP3_DR), (IEN — PTD — DIS — M4)) /*GPIO_142*/
```

```

MUX_VAL(CP(MCBSP3_CLKX), (IEN — PTD — DIS — M4)) /*GPIO_141*/
MUX_VAL(CP(MCBSP3_FSX), (IEN — PTD — DIS — M1)) /*UART2_RX*/
MUX_VAL(CP(UART2_TX), (IDIS — PTD — DIS — M0)) /*UART2_TX*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT7), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_139*/
MUX_VAL(CP(UART2_CTS), (IEN — PTD — DIS — M4)) /*GPIO_144*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT6), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_138*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT5), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_137*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT4), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_136*/
MUX_VAL(CP(UART2_RTS), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_145*/
MUX_VAL(CP(MCBSP1_DX), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_158*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT2), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_134*/
MUX_VAL(CP(MCBSP1_CLKX), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_162*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT1), (IEN — PTU — EN — M4)) /*GPIO_133*/
MUX_VAL(CP(MCBSP1_FSX), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_161*/
MUX_VAL(CP(MCBSP1_DR), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_159*/
MUX_VAL(CP(MCBSP1_CLKR), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_156*/
MUX_VAL(CP(MCBSP1_FSR), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_157*/
MUX_VAL(CP(I2C2_SDA), (IEN — PTD — EN — M4)) /*GPIO_183*/
MUX_VAL(CP(I2C2_SCL), (IEN — PTU — EN — M4)) /*GPIO_168*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT3), (IEN — PTD — EN — M1)) /*SPI3_CS0*/
MUX_VAL(CP(MMC2_DAT0), (IEN — PTU — EN — M1)) /*SPI3_SOMI*/
MUX_VAL(CP(MMC2_CMD), (IEN — PTU — DIS — M1)) /*SPI3_SIMO*/
MUX_VAL(CP(MMC2_CLK), (IEN — PTU — DIS — M1)) /*SPI3_CLK*/

```

Luego es necesario compilar para obtener el u-boot.bin.

```
$ cd /stuff/build
```

```
$ bitbake -f -c compile -b ../openembedded/recipes/u-boot/u-boot_git.bb
```

```
$ bitbake -f -c deploy -b ../openembedded/recipes/u-boot/u-boot_git.bb
```

Nota: Cada vez que introduzcamos un cambio, no es necesario ejecutar el comando con la opción clean (lo que implica volver a bajar los fuentes), solo basta con recompilar.

El archivo generado (u-boot.bin) se encuentra en

/stuff/build/tmp/deploy/glibc/images/beagleboard/ aunque con su nombre seguido de



un número identificador, el cual debe ser borrado para poder mantener el nombre `u-boot.bin`.

Pese a que en la literatura y foros, se plantea lo contrario, no fue posible establecer los atributos valor y dirección de los pines mediante la modificación planteada. Lo único que cambia es el modo del pin, con lo que se obtuvieron las señales que necesitamos. La solución a este inconveniente se muestra en (uImage-GPIO).

#### 6.4.4. uImage

La versión del kernel elegida fue la 2.6.32 que en el momento del desarrollo era la versión más estable.(ver si en algún lado puse compatibilidad con distro) Aunque también se hicieron pruebas con las versiones 2.6.29 y 2.6.37 (pruebas!). Durante la carga del uImage se cargan los módulos y controladores necesarios para funcionamiento del sistema embebido. También se montan las interfaces para poder interactuar con los distintos dispositivos a ser conectados a la Beagleboard como lo son: SPI, GPIO, UART, etc. Estas interfaces se deben encontrar bajo `/dev` en el sistema operativo. En algunos casos, no aparecen algunas de las interfaces configuradas en `/dev` lo que lleva a modificar los fuentes del kernel para que esto así suceda. En el proyecto la interfaz SPI no quedó mapeada en `/dev` pese a que había sido configurada en el u-boot; también hubo problemas con los atributos valor y dirección de los GPIO comentado antes; y hacía falta un módulo para la conexión USB-ethernet con la cual conectar la Beagleboard con una pc como si fuera por red. Todo esto llevó a que se tuvieran que modificar los fuentes del uImage como se muestra a continuación:

Comando necesarios para el desarrollo del uImage:

`$ bitbake virtual/kernel -c comando`

`virtual/kernel`: refiere a que estamos generando un kernel.

Entre los comandos:

`clean`: borra el contenido del directorio `work`. Borra todos los cambios hechos en la configuración del uImage fuente y parches agregados.

`patch`: genera los archivos de configuración y el fuente del uImage. Además le aplica los parches.

`menuconfig`: abre el editor de la configuración del kernel.

compile: compila todo.

deploy: genera los archivos referidos en este caso al uImage (.config, módulos, uImage) y los guarda en el directorio /stuff/build/tmp/deploy/glibc/images/beagleboard/.

Nota: Es necesario que todos estos comandos sean ejecutados en el orden adecuado para que todo funcione correctamente.

Primero configuramos bitbake para poder utilizarlo:

```
$ export BBPATH=/stuff/build:/stuff/openembedded
```

```
$ export PATH=/stuff/bitbake/bin:$PATH
```

Comenzamos el desarrollo:

```
$ cd /stuff/build
```

```
$ bitbake virtual/kernel -c clean
```

```
$ bitbake virtual/kernel -c patch
```

```
$ bitbake virtual/kernel -c menuconfig
```

Luego de ejecutar este comando se abre el editor de la configuración del kernel (ver figura XXX). Es este editor es donde se indican qué módulos cargar y cuales no. En este caso un cambio de configuración es necesario para el buen funcionamiento de la interfaz SPI y de la conexión USB-Ethernet con la Beagleboard.

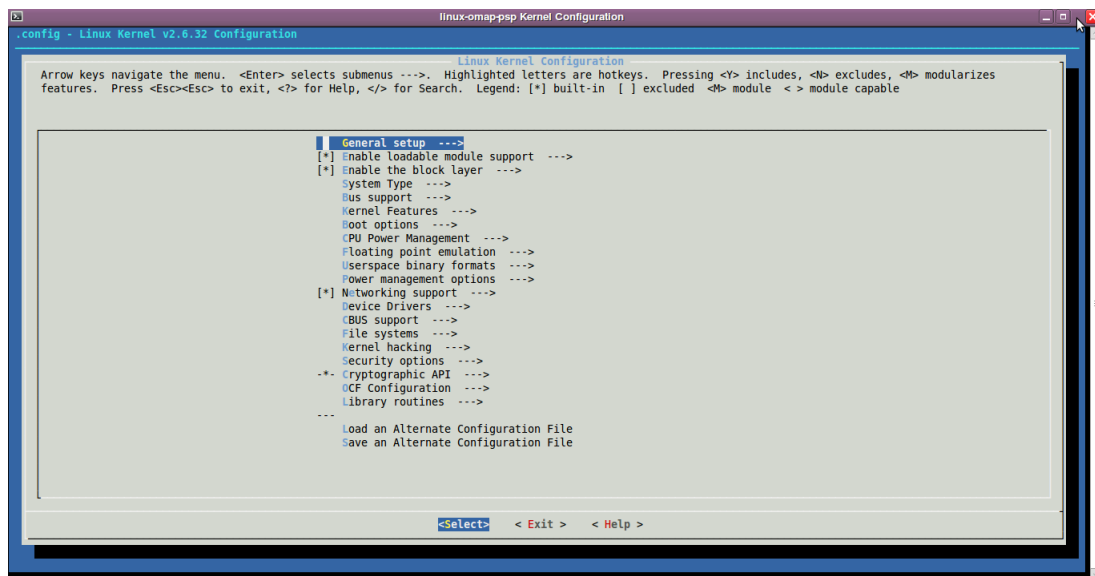


Figura 6.3: Editor de configuración del kernel

Para configurar la interfaz SPI, se debe configurar como sigue:

Device Drivers – SPI Support=y y luego como en la figura XX.

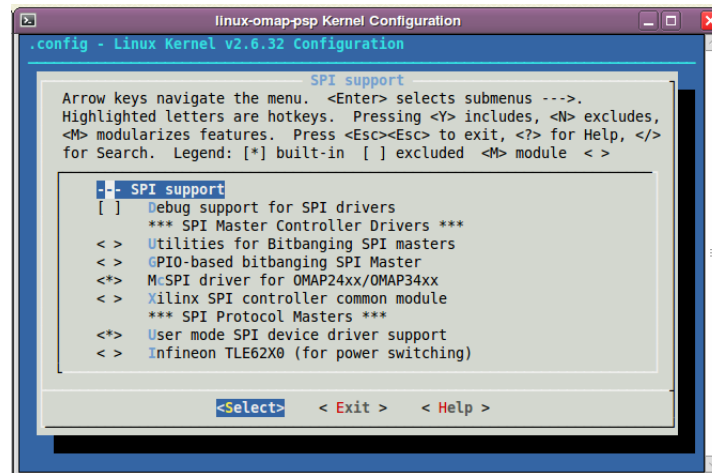


Figura 6.4: Configuración SPI

Para poder establecer la conexión por USB con la Beagleboard, se debe configurar como sigue:

Device Drivers – USB Support=y – USB Gadget Support=y y luego como en la figuraXX.

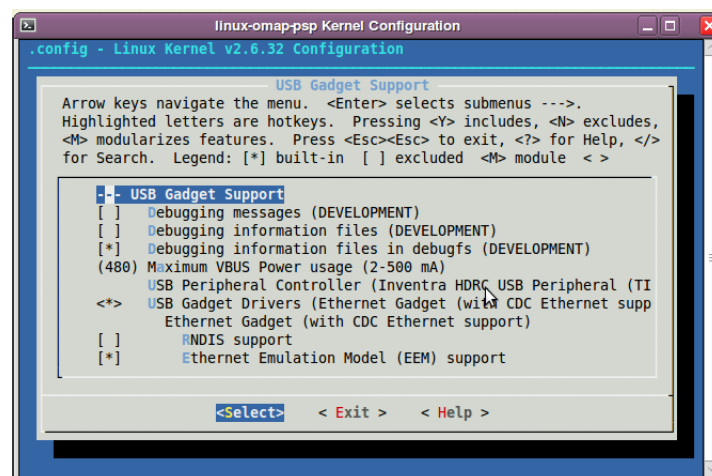


Figura 6.5: Configuración USB Gadget

Luego, es necesario modificar el archivo board\_omap3beagle.c que se encuentra en

/stuff/build/tmp/work/beagleboard-angstrom-linux-gnueabi/linux-omap-.../git/arch/arm/mach-omap2/. En este archivo está toda la inicialización de las interfaces. Los detalles de los cambios introducidos en este archivo se pueden observar en el anexo XXXX

Ahora se compila y genera el archivo uImage:

```
$ bitbake virtual/kernel -c compile
```

```
$ bitbake virtual/kernel -c deploy
```

Ahora dentro de /stuff/build/tmp/deploy/glibc/images/beagleboard/ está el archivo uImage generado.

Nota: Respecto al nombre del archivo, al igual que con el caso del u-boot.bin el nombre que aparece es un nombre más largo y necesita ser renombrado a uImage para que se pueda ejecutar correctamente.

#### **6.4.5. FileSystem**

#### **6.4.6. Librerías**

### **6.5. Ejecución de programa principal**

#### **6.5.1. Script para ejecución autónoma**

## **Parte III**

### **Ensayos**

# Capítulo 7

## Ensayos

### 7.1. SBC

Las Hawkboard fabricadas entre el 1º de agosto y el 20 de octubre de 2010 fueron vendidas en el mercado con un error a nivel de hardware que no había sido constatado por el fabricante y que no fue reconocido por éste hasta el mes de noviembre. La solución al problema fue liberada en la fecha 20 de diciembre de 2010 y constaba de sustituir en el circuito, los ferrites FB12 y FB13 por un puente de soldadura de estaño (el uso de jumper 0R fue probado sin obtener buenos resultados). Mayores detalles de la solución pueden encontrarse en el documento `Hawkboard_Press_Release_Solution.pdf`[anexo]. El inconveniente mencionado antes evitaba que el sistema operativo Linux iniciara correctamente, generándose un mensaje de “kernel panic” indicando que el sistema operativo no podía ser ejecutado. Esto evitó que se pudieran probar las partes de hardware y software que se tenían desarrolladas hasta ese entonces, teniendo que recurrirse a mecanismos alternativos como el uso de un microprocesador rabbit para efectuar pruebas sobre el lector/escritor RFID.

#### **Pruebas sobre las interfaces**

**Testeo de GPIO:** Para el testeo de los GPIO, se compiló y probó el archivo `led.c` (ver Anexo VI) el cual cambia el valor del pin 13 del bloque de expansión cada un segundo. Si se coloca un led entre este pin y la tierra, se puede ver como el led se prende y apaga.

**Testeo de UART:** Para el testeo de la interfaz serial UART, se compiló y probó el

programa `uart.c` (ver Anexo VI) que envía una serie de caracteres por `uart_tx` y luego lee por `uart_rx`. Para verificar el correcto funcionamiento se debe cortocircuitar `uart_tx` con `uart_rx`.

Testeo de SPI: Para el testeo del SPI se consiguió un ejecutable (`spidev_test`) que hace algo parecido a lo que realiza el archivo de testeo de la `uart`. En este caso debemos ejecutar el archivo con los parámetros correspondientes `./spidev_test -D /dev/spidev3.0` (`spidev3.0` porque se está usando `spi3` con `cs0`). Cuando se ejecuta, deben aparecer en pantalla varias filas con “FF”. Si cortocircuitamos el SIMO y el SOMI algunas filas deberían cambiar (no “FF”) y con esto queda verificado el buen funcionamiento del SPI.

## 7.2. VLT - Conversor de Voltajes

No existieron problemas en este módulo, y dadas las características del circuito no hay demasiados puntos de falla. Si fuera necesario verificar los valores de tensión en el regulador de tensión, la tensión de entrada puede ser medida desde el conector `CONN_14x2` y la de salida desde el conector `CONN_20x2`, ver Figura 5.1. Un detalle a tener en cuenta a la hora de medir los valores de tensión de las señales que pasan a través de los conversores de nivel, cuando las mismas se encuentren en estado ocioso (estáticas), es que no debe hacerse con multímetros de mala calidad, o se obtendrán valores incorrectos durante la medición. Se recomienda para una correcta medición el empleo de osciloscopio con puntas  $\times 10$ . Como se mencionó antes no se tuvieron inconvenientes con este módulo, pero generó conflictos en el circuito conversor full a half duplex del lector de tarjetas de contacto que serán detallados más adelante.

## 7.3. SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de usuario

### Lector de tarjetas de contacto ISO7816

Las primeras pruebas realizadas sobre el lector de tarjetas de contacto se efectuaron sobre una placa de circuito impreso de fabricación propia, conectándose el lector

directamente sobre el conector de expansión de la Beagleboard. La intención de esta prueba era más que nada la de probar el circuito conversor full a half duplex, transmitiendo una serie de bytes por el canal Tx y recibiendo el eco mediante el canal Rx, cotejando que los bytes recibidos coincidieran con los transmitidos. El primer problema encontrado aquí estuvo asociado a una falla en uno de los transistores, el PNP 3906, que debió ser sustituido por encontrarse defectuoso. El software usado aquí para efectuar las pruebas sobre el hardware se basa en un controlador serial desarrollado por el grupo de robótica del INCO, el cual fue mínimamente modificado ya que uno de los parámetros, CSIZE, en la configuración del puerto afectaba el número de bits que conforman un byte recibido. La línea de código que hacía referencia a este parámetro fue comentada ya que modificaba el valor del parámetro csN, con N=5 en lugar de N=8 (donde N es el número de bits que forman el byte). El cambio anterior permitió que los bytes recibidos en el canal Rx coincidieran con los transmitidos en Tx, validando en una primera instancia el hardware conversor full a half duplex del lector de tarjetas. El siguiente paso fue intercalar entre la Beagleboard y el lector de tarjetas de contacto, el conversor de niveles (VLT) para realizar las mismas pruebas que se datallaron antes, aunque en este caso los resultados no fueron alentadores ya que los bytes recibidos no coincidían con los transmitidos. Todo indicaba que el conversor de nivel afectaba el conversor full a half duplex. Luego de algunas pruebas más sobre el circuito, sin cambios favorables, se decidió consultar al foro de Texas Instruments (fabricante del integrado TXB0108). Desde el soporte técnico solicitaron se les enviara una imagen capturada con osciloscopio de las señales en el puerto serial para observar la forma de los pulsos. En la Figura “X” debajo se puede ver la deformación de los pulsos en la señal Rx (canal 1 del osciloscopio) cuando el circuito contaba con un valor de 500 Ohms en la resistencia R9 (ver Figura 5.3); la solución encontrada fue disminuir el valor de R9 y no aumentarlo como se había intentado anteriormente sin beneficio alguno. Al usar valores entre 90 Ohms y 180 Ohms para la resistencia R9, la forma de los pulsos recibidos en Rx (canal 1) fueron la copia de los pulsos transmitidos en Tx (canal 2), como puede verse en la Figura “Y” para un valor de 90 Ohms. Aquí puede verse el hilo de discusión en el foro: [http://e2e.ti.com/support/interface/etc\\_interface/f/391/t/114719.aspx](http://e2e.ti.com/support/interface/etc_interface/f/391/t/114719.aspx).

Una vez superados los obstáculos anteriores fue posible probar el circuito completo del lector, incluyendo la tarjeta de contacto en su zócalo correspondiente. El software



usado en tal fin se basa en un controlador serial, implementado por David Corcoran (uno de los desarrolladores de pcsc-lite), el cual debió ser modificado para usarse en el lector de tarjetas de contacto del prototipo  $RF^2$ . Una de las mayores dificultades encontrada en esta etapa fue el hallar los parámetros adecuados de inicialización del puerto serial, que debe cumplir con las opciones 8E2 (8 bits por byte, bit de paridad par, y dos bits de parada) para operar con las tarjetas de contacto compatibles con la norma ISO7816; sin embargo la opciones adecuadas elegidas en la configuración del puerto serial fueron 8E1. Adicionalmente al problema de encontrar las opciones correctas mencionadas antes, fue que los bytes de datos recibidos como el ATR de la tarjeta no coincidían en su totalidad con los valores esperados (leídos con un lector Omnikey 3121 y la herramienta pcsc\_scan de pcsc-lite), sólo algunos bytes y algunos nibbles bajos eran correctos. Esta diferencia estuvo asociada a la frecuencia usada para alimentar la señal de reloj de la tarjeta de contacto; se usaron frecuencias de 4 Mhz y 5 Mhz que si bien podrían usarse según se indica en [handbook SC] para los parámetros especificados en el ATR de las tarjetas empleadas, estos valores no fueron adecuados según ya indicamos, teniendo que usar en su lugar un oscilador de frecuencia 3,579545 Mhz, valor que no se consiguió cuando se realizó la primer compra de componentes. Una dificultad adicional tuvo que ser sorteada en este módulo de hardware, el diseño del PCB que se envió a fabricar tenía un error, las pistas de datos de Rx y Tx estaban intercambiadas. El diseño tuvo que ser corregido y se envió a fabricar un nuevo PCB.

### **Interfaz de usuario**

No existieron mayores inconvenientes con la interfaz para el usuario, sí fue necesaria la corrección en el valor de una resistencia en el circuito que calibra el contraste del LCD, ya que los caracteres se observaban muy tenues.

Al momento de probar el display imprimía caracteres extraños, salvo cuando se enviaban mensajes conteniendo una única palabra. Se probó cambiando los mensajes a desplegar en el mismo, y el problema persistía, pero se llegó a la conclusión de que era provocado por los espacios (“ ”) puesto que cuando se envió un mensaje omitiéndolos fue desplegado en forma correcta. Luego simplemente se modificó el código fuente,

para que cada vez que recibiera un caracter espacio, enviara al display el código ASCII correspondiente solucionando el problema.

Cuando se comenzaron a imprimir los saldos de las tarjetas, volvió a imprimir caracteres extraños, esta vez el problema eran los caracteres “0”. La solución más rápida encontrada fue imprimir “O” cada vez que llegara un caracter “0”, por lo que se modificó el código para que así sea.

## 7.4. Lector/Escritor RFID

Como se mencionó antes, cuando se tuvo pronto el PCB del lector/escritor RFID aún la SBC no estaba pronta para poder conectarlo y hacer las pruebas necesarias. Por lo tanto, como se tenía un kit de desarrollo rabbit 4000, se conectó el lector/escritor al rabbit y se comenzó el testeado de hardware. Para esto, previamente, hubo que configurar los pines del rabbit de modo de obtener un puerto SPI a través del cual pudiera comunicarse con el CL RC632 soldado en el PCB. El compilador Dynamic C ya incluye una librería SPI que se utilizó para facilitar el trabajo.

Todo el software implementado para pruebas fue realizado a partir de lo estudiado en la librería librfid (<http://openmrtd.org/projects/librfid/>).

Una vez que el SPI estuvo operativo, se comenzó con pruebas muy básicas como enviar un comando específico al CL RC632 y esperar la respuesta correcta según la hoja de datos del CL RC632. En principio no se recibía lo esperado, pero el problema era que el puerto no estaba configurado en forma correcta, luego de reconfigurarlo en varias oportunidades (testeándolo con un led) se llegó a la configuración correcta y el CL RC632 comenzó a responder lo esperado. Fue entonces que se probaron otros comandos y surgieron otros errores. Se diseñó entonces una función para enviar comandos a registros, previo comprender el funcionamiento de los mismos (8 páginas, con 8 registros cada una). Se logró leer y escribir la memoria fifo, también resetearla (borrarla por completo y reseteando todas sus banderas). Se probó leer la eeprom, leyendo información conocida. Luego se escribió en la misma y se leyó lo escrito como prueba de que funciona. Se le dio el formato necesario a la clave de una tarjeta, para almacenar en memoria, y se cargó en la memoria correspondiente. Por último se intentó dialogar con una tarjeta, sin éxito. Aunque se verificó que el lector/escritor RFID modulaba, puesto

que se pudo observar en el osciloscopio (se puede ver foto!). Se implementó un detector de campo magnético (una bobina con un led) (se puede sacar una foto :) ) para comprobar la presencia de la portadora en los alrededores de la antena. Gracias al mismo, se observó que no había campo generado por el inductor del circuito impreso (no había portadora), por lo que se desconectó dicho inductor y se realizó otro que se soldó al PCB y es el que logró modular.

Para observar la forma de las señales se usó un osciloscopio, verificando que las mismas fueran correctas y cumplieran con las condiciones indicadas en el manual del CL RC632 .

Luego, estuvo pronta la SBC. Se conectó entonces el PCB por SPI y se comenzaron las pruebas ya en el hardware del prototipo  $RF^2$ . Si bien con el rabbit se pudo verificar parte del hardware, la antena propiamente dicha no estaba verificada, puesto que no se logró leer tarjeta alguna. Se revieron entonces todas las pruebas efectuadas desde el rabbit, ahora en la SBC. Luego de varios días de trabajo sin lograr leer tarjetas, se midió (por sugerencia de Juan Pablo Oliver) en el Instituto de Ingeniería Eléctrica la impedancia de la antena. La misma no era la que se obtuvo en los cálculos teóricos, estaba muy por encima (ver figura). Se procedió entonces, siguiendo las recomendaciones de las notas de diseño (APP NOTES, ver anexo supongo), a modificar el circuito de matcheo. Se sustituyeron y agregaron condensadores hasta lograr mejorar la frecuencia de resonancia del inductor. Luego, mejorado el circuito de matcheo, se re-fabricó el PCB. El mismo seguía sin lograr leer tarjetas. Entonces se volvió a revisar la configuración del puerto SPI en la Beagleboard, y luego de varias pruebas con el osciloscopio (Ed y Dan si quieren detallan porque no sé bien que hicieron, yo estaba con el rabbit, dijo Daniel: `./spidev_test -D /dev/spidev3.0 frecuencia`) se llegó a la conclusión de que el problema era de software. Se encontró entonces que el pin de reset no se estaba poniendo a nivel bajo como se debía hacer. Luego de corregir el error, se comenzó a leer parte de las tarjetas, aunque aparecían varios errores. Fue entonces que se pensó que también existía un problema de velocidad de recepción en los datos, se varió la frecuencia del puerto SPI hasta que se logró leer completamente cada una de las tarjetas. Por último se probó escribir las tarjetas con un programa de testeo existente en la librería `librfid`, sin problemas. Luego, cuando se implementó el software específico del prototipo  $RF^2$  surgieron problemas pero se debían a que el acceso a la tarjeta para escribir se realiza

con la claveB y se estaba usando la claveA.

## **Parte IV**

### **Compras**

# Capítulo 8

## Compras

### 8.1. SBC

| Componente                 | Descripción                     | Cantidad | Precio x1 | Total |
|----------------------------|---------------------------------|----------|-----------|-------|
| SBC                        | Beagleboard RevC4               | 1        | 125       | 125   |
| Memoria SD                 | 4GB SDHC Class 6 SD Card        | 1        | 15        | 15    |
| Cable serial DB9 nulo      | DB9F Null Modem (RS-232) (6-ft) | 1        | 4         | 4     |
| Cable conversor usb–serial | USB to DB9M RS-232 (PL-2302)    | 1        | 10        | 10    |
| Cable USB                  | USB Mini-A to USB A Female, OTG | 1        | 9         | 9     |
| Cable USB                  | USB Mini-B Male to USB A Male   | 1        | 5         | 5     |
| Fuente                     | 5VDC/2,5A                       | 1        | 10        | 10    |
|                            |                                 |          |           | 178   |

Cuadro 8.1: SBC

## 8.2. PCBs

| Componente | Descripción                                      | Cantidad | Precio x1 | Total |
|------------|--|----------|-----------|-------|
| VLT        | Interfaz entre SBC y SCUI                        | 1        | 28        | 28    |
| SCUI       | Interfaz de usuario y lector de tarjetas ISO7816 | 1        | 53        | 53    |
| RWD RFID   | Lector/Escritor de tarjetas RFID ISO14443        | 1        | 64        | 64    |
|            |  |          |           | 145   |

Cuadro 8.2: PCBs

## 8.3. VLT

| Componente | Descripción                  | Footprint      | Valor       | Cantidad | Precio x1 | Total |
|------------|------------------------------|----------------|-------------|----------|-----------|-------|
| C1         | Polarized Capacitor (Tantal) | 6032[2312]     | 10uF, 25V   | 1        | 1,09      | 1,09  |
| C2         | Polarized Capacitor (Tantal) | 6032[2312]     | 100uF, 6V3  | 1        | 1,16      | 1,16  |
| U4         | Regulador LM1117-3.3         | SOT-223        | 3.3V, 800mA | 1        | 1,1       | 1,1   |
| U1, U2, U3 | Voltage Level Translator     | TSSOP20        | -           | 3        | 2,24      | 6,72  |
| P1         | RECEPTACLE, 28WAY, 2ROW      | SMD Pitch 2,54 | 28 pines    | 1        | 4,19      | 4,19  |
| P2         | RECEPTACLE, 40WAY, 2ROW      | SMD Pitch 2,54 | 40 pines    | 1        | 4,36      | 4,36  |
| P1b        | HEADER, 28WAY, 2ROW          | T H Pitch 2,54 | 28 pines    | 1        | 2         | 2     |
| P2b        | HEADER, 40WAY, 2ROW          | T H Pitch 2,54 | 40 pines    | 1        | 1,94      | 1,94  |
|            |                              |                |             |          |           | 22,56 |

Cuadro 8.3: VLT

## 8.4. SCUI

| Componente    | Descripción                   | Footprint         | Valor             | Cantidad | Precio x1 | Total |
|---------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|----------|-----------|-------|
| R9            | Resistor 100W<br>1/4W 1 %     | 3216[1206]        | 100W<br>1/4W 1 %  | 1        | 0,07      | 0,07  |
| R10, R13      | Resistor<br>100KW 1/4W<br>5 % | 3216[1206]        | 100KW<br>1/4W 5 % | 2        | 0,09      | 0,18  |
| R11, R12, R14 | Resistor<br>10KW 1/4W<br>5 %  | 3216[1206]        | 10KW<br>1/4W 5 %  | 3        | 0,08      | 0,24  |
| Q2            | TRANSISTOR,<br>NPN,<br>300MHZ | SOT23             | MMBT3904          | 1        | 0,125     | 0,125 |
| Q3            | TRANSISTOR,<br>PNP, 250MHZ    | SOT23             | MMBT3906          | 1        | 0,18      | 0,18  |
| J2            | SIM socket (6<br>contacts)    | SMD               | -                 | 1        | 1,25      | 1,25  |
| JP3, JP4      | HEADER,<br>1ROW, 3WAY         | T H Pitch<br>2,54 | 3 pines           | 2        | 0,11      | 0,22  |
| X1            | Oscillator<br>3.579545MHz     | SMD               | 3.579545<br>Mhz   | 1        | 5,25      | 5,25  |
| ESD1          | Anti ESD                      | SOT323            | 6V / 150W         | 1        | 0,45      | 0,45  |
|               |                               |                   |                   |          |           | 7,965 |

Cuadro 8.4: SC

| Componente | Descripción               | Footprint  | Valor              | Cantidad | Precio x1 | Total |
|------------|---------------------------|------------|--------------------|----------|-----------|-------|
| R1         | Resistor 4K7<br>1/10W 1 % | 1608[0603] | 4,7KW<br>1/10W 1 % | 1        | 0,05      | 0,05  |



|            |                                   |                   |                       |   |       |       |
|------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|---|-------|-------|
| R2, R8     | Resistor 3R3<br>1/10W 1 %         | 1608[0603]        | 3,3W<br>1/10W 1 %     | 2 | 0,09  | 0,18  |
| R3, R4, R5 | Resistor 680R<br>1/10W 1 %        | 1609[0603]        | 680W<br>1/10W 1 %     | 3 | 0,05  | 0,15  |
| R6, R7     | Resistor 10K<br>1/10W 1 %         | 1608[0603]        | 10KW<br>1/10W 1 %     | 2 | 0,05  | 0,1   |
| RV1        | Preset 15K<br>1/10W 25 %          | SMD               | 15KW<br>1/10W<br>25 % | 1 | 0,71  | 0,71  |
| Q1         | TRANSISTOR,<br>NPN, 300MHZ        | SOT23             | MMBT3904              | 1 | 0,125 | 0,125 |
| S1         | LCD MODULE<br>16X2 CHARAC-<br>TER | Pitch 2,54        | -                     | 1 | 10,85 | 10,85 |
| CONN1      | HEADER<br>FEMALE<br>16POS.1”TIN   | Through<br>Hole   | 16 pines              | 1 | 1,25  | 1,25  |
| CONN2      | HEADER,<br>1ROW, 16WAY            | T H Pitch<br>2,54 | 16 pines              | 1 | 0,155 | 0,155 |
| LED1       | Led green 5mm                     | Through<br>Hole   | 1,9V, 2mA             | 1 | 0,11  | 0,11  |
| LED2       | Led red 5mm                       | Through<br>Hole   | 1,9V, 2mA             | 1 | 0,1   | 0,1   |
| LED3       | Led yellow 5mm                    | Through<br>Hole   | 2,4V, 2mA             | 1 | 0,13  | 0,13  |
| BUZZ1      | Buzzer                            | Through<br>Hole   | 3 20Vdc,<br>3 16mA    | 1 | 5,31  | 5,31  |
|            |                                   |                   |                       |   |       | 19,17 |

Cuadro 8.5: LCD

## 8.5. Lector-Escritor RFID

| Componente     | Descripción | Footprint  | Valor                   | Cantidad | Precio x1 | Total |
|----------------|-------------|------------|-------------------------|----------|-----------|-------|
| C1, C2         | Capacitor   | 1608[0603] | 10pF, Ceramic NPO, 2 %  | 2        | 0,135     | 0,27  |
| C3, C4         | Capacitor   | 1609[0603] | 100pF, Ceramic NPO, 2 % | 2        | 0,194     | 0,388 |
| C5, C6, C7, C8 | Capacitor   | 1608[0603] | NC                      | 4        | -         | 0     |
| R1, R2         | Resistor    | 1608[0603] | 0W, 1/10W, 1 %          | 2        | 0,015     | 0,03  |
|                |             |            |                         |          |           | 0,688 |

Cuadro 8.6: Inductor + Adaptación

| Componente | Descripción | Footprint  | Valor                   | Cantidad | Precio x1 | Total |
|------------|-------------|------------|-------------------------|----------|-----------|-------|
| C10        | Capacitor   | 1610[0603] | 10pF, Ceramic NPO, 2 %  | 1        | 0,135     | 0,135 |
| C1, C2     | Capacitor   | 1608[0603] | 15pF, Ceramic NPO, 5 %  | 2        | 0,03      | 0,06  |
| C12, C13   | Capacitor   | 1608[0603] | 56pF, Ceramic NPO, 2 %  | 2        | 0,194     | 0,388 |
| C14, C15   | Capacitor   | 1608[0603] | 68pF, Ceramic NPO, 1 %  | 2        | 0,197     | 0,394 |
| C9         | Capacitor   | 1609[0603] | 100pF, Ceramic NPO, 2 % | 1        | 0,194     | 0,194 |
| C16        | Capacitor   | 1608[0603] | 1nF, Ceramic NPO, 10 %  | 1        | 0,08      | 0,08  |

|   |                                    |            |                          |   |       |       |
|---|------------------------------------|------------|--------------------------|---|-------|-------|
| C4,<br>C5,<br>C7,<br>C8,<br>C11,<br>C17 | Capacitor                          | 1608[0603] | 100nF, Ceramic X7R, 10 % | 6 | 0,074 | 0,444 |
| C3,<br>C6,<br>C18                       | Capacitor                          | 1608[0603] | 10uF, Ceramic X5R, 20 %  | 3 | 0,195 | 0,585 |
| L1,<br>L2,<br>L3,<br>L6                 | Inductor                           | 2012[0805] | 22nH, 700mA, 5 %         | 4 | 0,454 | 1,816 |
| L4,<br>L5                               | Inductor                           | 3225[1210] | 1uH, 400mA, 5 %          | 2 | 0,29  | 0,58  |
| R3                                      | Resistor                           | 1608[0603] | 50W, 1/10W 1 %           | 1 | 0,268 | 0,268 |
| R2                                      | Resistor                           | 1608[0603] | 820W, 1/10W 5 %          | 1 | 0,027 | 0,027 |
| R1                                      | Resistor                           | 1608[0603] | 2,2KW, 1/5W 1 %          | 1 | 0,08  | 0,08  |
| U1                                      | Reader<br>ISO14443                 | SO32       | CL RC632                 | 1 | 14,22 | 14,22 |
| U2                                      | Crystal Oscillator, HC49<br>US SMD | 49USMXL    | 13.56MHz, 10pF           | 1 | 0,98  | 0,98  |
| U3                                      | Operational Amplifier (up to 7.5V) | SOT23-5    | OPA354                   | 1 | 2,8   | 2,8   |

|                 |                               |                   |          |   |       |       |
|-----------------|-------------------------------|-------------------|----------|---|-------|-------|
| CONN1,<br>CONN2 | U.FL-R Con-<br>nector         | U.FL-R-<br>SMT    | -        | 2 | 1,76  | 3,52  |
| J1              | HEADER,<br>10WAY,<br>2ROW     | T H Pitch<br>2,54 | 10 pines | 1 | 0,389 | 0,389 |
| J1b             | RECEPTACLE,<br>10WAY,<br>2ROW | SMD Pitch<br>2,54 | 10 pines | 1 | 2,27  | 2,27  |
|                 |                               |                   |          |   |       | 29,23 |

Cuadro 8.7: CL RC632 + filtro EMC

## **Parte V**

### **Anexos**

# Apéndice A

## Lector/Escritor RFID

### A.1. Reglas y Parámetros de Diseño de una Antena RF

Pasos para el diseño de la antena RF:

- A) Diseñar el inductor, medir su inductancia  $L$  y resistencia  $R$  (o factor de calidad  $Q$ ).
- B) Calcular los capacitores para el circuito resonante, que forman junto con el inductor.
- C) Sintonizar el circuito resonante junto con el filtro pasa bajo a la impedancia requerida.
- D) Conectar el circuito resonante a la salida del integrado(TX1 y TX2), verificar la corriente  $I_{TVDD}$  y si es necesario sintonizar los componentes para un desempeño óptimo.
- E) Verificar y ajustar el factor de calidad  $Q$ .
- F) Verificar y ajustar el circuito receptor.

#### A.1.1. Diseño del inductor

Se recomienda usar antenas cuyo inductor tenga forma circular o cuadrado. El valor exacto del inductor es difícil de calcular pero puede ser aproximado por la siguiente

ecuación:

$$L_1[nH] = 2 \cdot l_1 \cdot \left( \ln\left(\frac{l_1}{D_1}\right) - K \right) \cdot N_1^{1,8}$$

donde:

$l_1$  ..... Longitud de una vuelta del conductor (en cm).

$D_1$  ..... Diámetro del conductor o ancho del conductor del PCB.

$K$  ..... Factor de forma ( $K = 1,07$  antena circular y  $K = 1,47$  antena cuadrada).

$N_1$  ..... Número de vueltas.

La antena debe ser simétrica, donde el punto central puede estar conectado a GND. Si esto es así, se sugiere mantener este punto lo más cercano posible al conector de la antena. El radio de la antena deberá ser  $r > 5cm$  para una sola vuelta de cada uno de los inductores simétricos  $L_a$  y  $L_b$ , o  $r < 5cm$  para dos vueltas. El blindaje de campo eléctrico debe ser conectado a GND.

Los valores de inductancia y resistencia del inductor, si se siguen las reglas de diseño, se encuentran entre:

$$L = 300nH...2\mu H$$

$$R_{coil} = 0,5\Omega...5\Omega$$

### Resistor externo

En serie con el inductor se agrega un resistor externo. El valor del mismo se encuentra mediante las ecuaciones:

$$Q = \frac{wL}{R_{coil}} \rightarrow R_{coil} = \frac{wL}{Q}$$

y  $R = 2 \cdot R_s + R_{coil} = R_{Sa} + R_{Sb} + R_{coil}$ , donde  $R$  es la resistencia total,  $R_{Sa}$  y  $R_{Sb}$  son cada uno de los

Definiendo  $Q$  entre 20 y 30, se pueden hallar los resistores externos:

$$R_{Sa} = R_{Sb} = \frac{1}{2} \cdot (R - R_{coil}) = \frac{wL}{2Q} - \frac{R_{coil}}{2} \text{ con } w = 2\pi \cdot 13,56MHz$$

Dejando de lado la influencia de todos los otros componentes en el factor  $Q$ , este cálculo sólo da una estimación del valor de  $R_s$ , pero esta estimación es necesaria para el cálculo de los capacitores del circuito de resonancia.

En muchas aplicaciones prácticas es posible observar que se prescinde del valor de resistencia externa  $R_s$ , teniendo en cuenta sólo el valor de resistencia del inductor  $R_{coil}$ .

### A.1.2. Capacitores del circuito resonante

Gracias a la simetría del circuito es posible simplificar los cálculos operando sólo con la mitad del circuito, por tanto los valores del inductor  $L$ , la resistencia  $R$  (incluyendo el resistor externo) y el valor de impedancia requerida de la antena  $Z_{ant}$ , empleados en los siguientes cálculos son la mitad del valor correspondiente a la totalidad del circuito. Aplicando entonces la suma de impedancias a la mitad del circuito y sabiendo que el resultado tiene que ser real e igual a  $Z_{ant}$ , es posible hallar los valores del capacitor paralelo  $C_2$  y el capacitor serie  $C_1$  mediante las siguientes igualdades:

$$C_{2a} = C_{2b} = \frac{L}{\omega^2 L^2 + R^2} - \frac{R}{(\omega^2 L^2 + R^2) \omega \sqrt{\frac{Z_a}{\omega^2 L^2 + R^2} - Z_a}}$$

$$C_{1a} = C_{1b} = \frac{1}{\omega \sqrt{Z_a \cdot \left( \frac{\omega^2 L^2 + R^2}{R} - Z_a \right)}}$$

$$Z_{ant} = 250\Omega$$

El valor de  $Z = 2 \cdot Z_{ant} = 500\Omega$  podría ser incrementado hasta  $Z = 2 \cdot Z_{ant} = 800\Omega$  para incrementar la potencia de salida, pero el límite de corriente de salida desde el integrado no debe ser excedido.

### A.1.3. Sintónizar el circuito resonante

El circuito todo (incluyendo el filtro pasa bajos) tiene que ser adaptado a una impedancia de aproximadamente  $40\Omega$  entre TX1 y TX2 ( $500\Omega$  si no tenemos en cuenta el filtro). Donde los valores propuestos para los componentes del filtro son:

$$L_0 = 1\mu H \text{ (e.g. TDK NL322522T-1R0J)}$$

$$C_{01} = 68pF \text{ (Ceramic NP0, tolerance } \leq \pm 2\%)$$

$$C_{02} = 56pF \text{ (Ceramic NP0, tolerance } \leq \pm 2\%)$$

Con estos valores, la frecuencia de resonancia del filtro se encuentra centrada en  $14,4MHz(13,56MHz + 847,5KHz)$ . Esto mejora la performance en dos formas:

- Incrementa la relación señal a ruido de la señal recibida.
- Decrementa el sobretiro de los pulsos transmitidos, mejorando la calidad de la señal transmitida.



El procedimiento para sintonizar el circuito, es el siguiente:

Los materiales necesarios son:

- Generador de señales ( $13,56\text{MHz}$ ).
- Osciloscopio con puntas de prueba.
- Resistor de referencia ( $40\Omega$ ).

Se debe conectar las puntas del osciloscopio a la salida del generador y en paralelo un resistor de referencia de  $40\Omega$  ( $500\Omega$  en caso de sintonizar el circuito sin conectar el filtro pasa bajos).

#### *Calibración*

Se genera una señal sinusoidal de frecuencia  $13,56\text{MHz}$  y de amplitud entre  $2\text{V}$  y  $5\text{V}$ . El osciloscopio se configura para observar las figuras de Lissajous, con la escala del eje X dos veces la del eje Y. Se calibra el capacitor,  $C_{cal}$ , de la punta de prueba del osciloscopio hasta que la figura de Lissajous sea un segmento de recta, inclinado  $45^\circ$ .

#### *Sintonizado*

Luego de la calibración se sustituye el resistor de referencia por la antena y se sintoniza la misma variando los capacitores  $C_1$  y  $C_2$ , hasta que se obtenga una figura como la obtenida en el caso anterior. En ese momento la antena se encuentra sintonizada.

En caso de contar con un analizador de redes, el método anterior puede ser evitado, ya que es posible sintonizar el circuito buscando que la impedancia en el diagrama de Smith se ubique sobre el eje real al alcanzar la frecuencia de trabajo, en este caso  $13,56\text{MHz}$ .

### **A.1.4. Valor de $I_{TVDD}$**

El integrado de la familia Micore, entrega a la salida una señal cuadrada, con valor de pico a pico  $U_{TxAC} = 2,5V_{pp}$  centrada en el valor de continua  $U_{TxDC} = 2,5\text{V}$ , con una frecuencia  $f_0 = 13,56\text{MHz}$  y un máximo de salida de corriente:

$$I_{TVDD} \leq 150\text{mA}$$

Esto significa que la salida TX oscila entre 0V y 5V. TX1 y TX2 usualmente están desfasados 180°, dependiendo de la configuración del bit 3 (TX2Inv) del registro Tx-Control (ver hoja de datos del integrado RC632).

### A.1.5. Factor de calidad $Q$

El factor de calidad  $Q$  está directamente asociado con la forma de los pulsos modulados, éste puede ser usado para verificar el valor del factor.

Un osciloscopio con al menos 50MHz de ancho de banda puede ser usado para observar la forma de los pulsos; donde los canales son conectados de la siguiente forma:

CH1: La punta de prueba conectada en este canal forma un loop con su línea de tierra para generar el acoplamiento necesario al estar próxima a la antena.

CH2: Este canal es conectado a la salida del pin 4 (MFout) de integrado y es usado como canal de disparo.

El registro MFoutSelect (26h) es configurado con los valores:

“2” para que la señal sea modulada con código Miller.

“3” para flujo de datos serial (sin código Miller).

Ver hoja de datos del integrado RC632 por más detalles.

Es recomendado verificar que la forma de los pulsos cumpla con lo establecido en la norma ISO14443. La figura debajo muestra como son estos pulsos. Para garantizar que la antena se encuentre bien sintonizada y el factor  $Q$  sea el correcto, debe verificarse que:

- i. La señal caiga debajo del 5 % de su valor máximo (sin tener en cuenta el sobretiro).
- ii. El tiempo  $t_2$  debe estar limitado entre:  $0,7\mu s < t_2 < 1,4\mu s$ .

Si  $t_2 < 0,7\mu s$ , el factor  $Q$  es muy alto (mayor que 35), por lo tanto la resistencia externa  $R_{ext}$  debe ser incrementada.

Si  $t_2 > 1,4\mu s$  el factor  $Q$  es muy bajo, la distancia de operación no será cumplida y por lo tanto  $R_{ext}$  debe ser decrementada.

La tabla siguiente muestra la duración de los pulsos en  $\mu s$  de acuerdo a la norma ISO 14443.

| Pulses length | t1  | t2 min | t3 max | t4 max |
|---------------|-----|--------|--------|--------|
| T1 MAX        | 3.0 | 0.7    | 1.0    | 0.4    |
| T1 MIN        | 2.0 | 0.7    | 1.0    | 0.4    |

Cuadro A.1: Duración de los pulsos en  $\mu s$  - ISO 14443

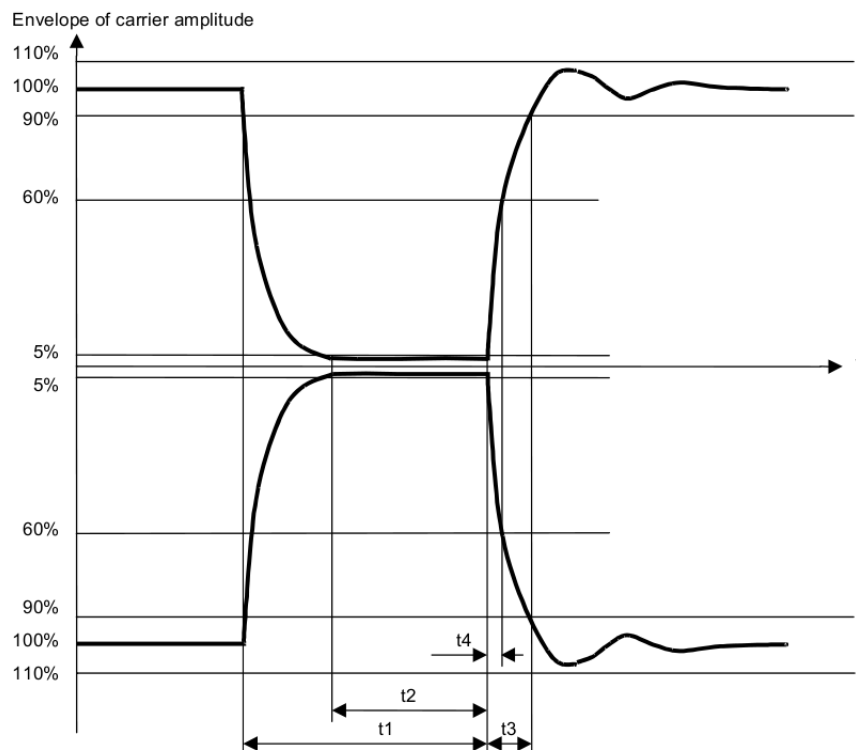


Figura A.1: Forma de pulso acorde a la norma ISO 14443

### A.1.6. Circuito receptor

Cuando ya se han tomado en cuenta todos los cuidados en el diseño del transmisor, el circuito receptor debe ser conectado y ajustado. Los valores de los componentes sugeridos en el circuito receptor son los siguientes:

$$C_3 = 1nF \text{ (Ceramic NP0, tolerance } \leq \pm 10\%)$$

$$C_4 = 100nF \text{ (Ceramic X7R, tolerance } \leq \pm 10\%)$$

$$R_1 = 470\Omega \dots 4,7k\Omega$$

$$R_2 = 820\Omega$$

Dos reglas deben ser tenidas en cuenta para este circuito:

- i. El nivel de tensión de continua, DC, en la entrada Rx tiene que ser mantenido a  $V_{mid}$  (por eso es necesario  $R_2$  y  $C_4$ , ver figura debajo).
- ii. El nivel de tensión de alterna, AC, en la entrada Rx debe ser mantenido entre los siguientes límites:  $1,5V_{pp} < V_{Rx} < 3,0V_{pp}$ .

Si  $V_{Rx} > 3,0V_{pp}$ ,  $R_1$  debe ser incrementada.

Si  $V_{Rx} < 1,5V_{pp}$ ,  $R_1$  debe ser decrementada.

El voltaje a la entrada Rx debe ser verificado con y sin presencia de una tarjeta entre los límites máximo y mínimo de distancia de operación.

*El valor límite  $V_{Rx} = 3,0V_{pp}$  no debe ser excedido, un valor mayor puede causar fallos en la recepción.*

### Otros puntos a tener en cuenta

#### PCB

La parte más crítica de todo el circuito analógico es el directamente conectado al integrado, o sea el filtro pasa bajos y la conexión de TVDD a la fuente de alimentación. Entonces, por un lado un filtro puede ser usado para la conexión a la fuente de alimentación. Por otro lado el diseño del filtro a la salida del integrado, formado por  $L_0$  y

$C_0$ , debe ser considerado con mucho cuidado. El área y la distancia del filtro al integrado deben ser mantenidas lo más pequeñas posibles. Es recomendado además un plano de tierra.

La figura siguiente muestra un esquemático del diseño de una antena:

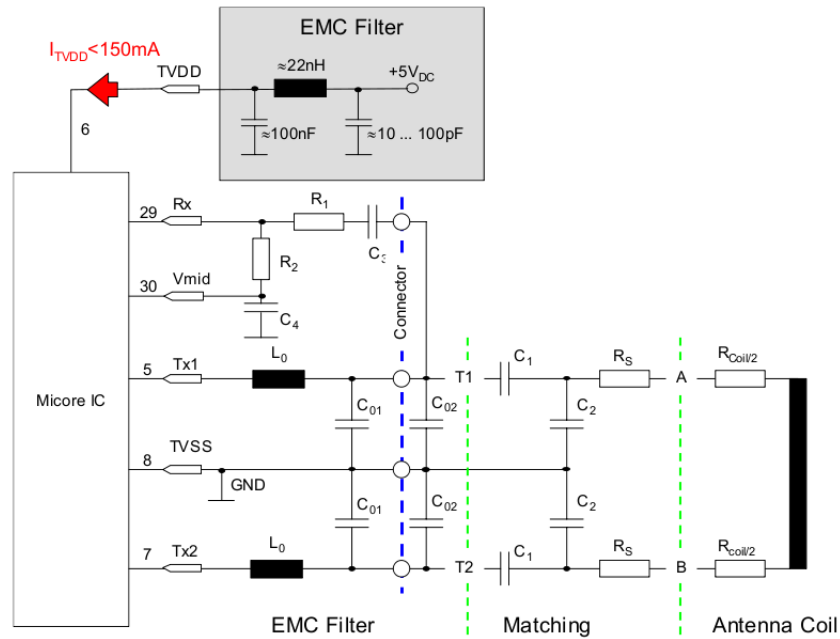


Figura A.2: Esquema de una antena, identificando sus principales secciones

#### Filtro de entrada de alimentación

Aunque no sería necesario, un filtro puede ser conectado a la entrada TVDD para mejorar los siguientes puntos:

- a) suprimir ruido llegado desde la fuente de alimentación.
- b) suprimir armónicos provenientes desde el transmisor.

Filtros idénticos pueden ser ubicados en las entradas AVDD y DVDD.

#### Blindaje

El blindaje eléctrico absorbe el campo eléctrico generado por la antena. Para construir un blindaje, es recomendable usar un PCB de al menos 4 capas, donde el loop del blindaje se encuentra en las 2 capas externas. Este loop no debe ser cerrado y debe estar conectado en su punto central al sistema de tierra mediante una vía. Los extremos de la bobina deben ser ruteados próximos entre sí para evitar inductancias adicionales. La figura siguiente da una idea de como debe ser un blindaje:

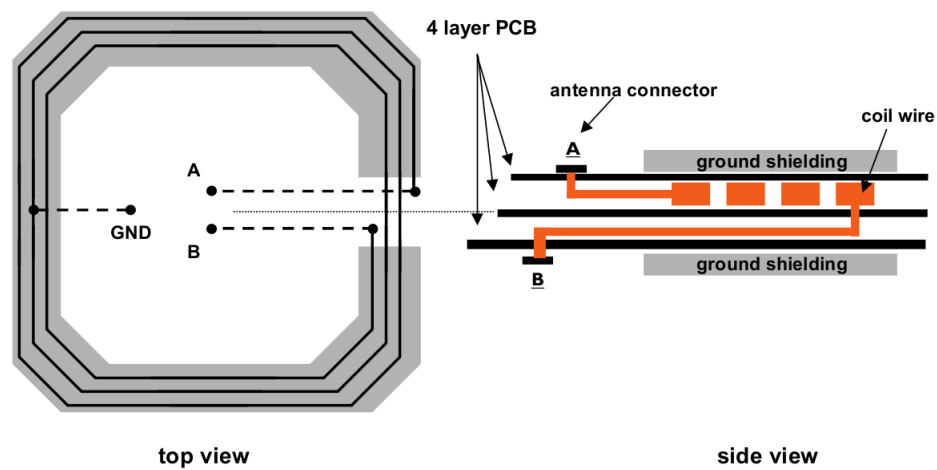


Figura A.3: Blindaje de una antena en un diseño de 4 capas

# **Parte VI**

## **Bibliografía**