

**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 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.

para cuchu,  
chuchuchu,  
y pirimpirim.

## 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, retínales, 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
<b>I Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Descripción del proyecto</b>	<b>2</b>
1.1. Definición . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	2
<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
<b>II Diseño</b>	<b>6</b>
<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
<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 . . . . .	18
4.4.3.	SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario . . .	19
4.4.4.	Lector-Escritor RFID . . . . .	21
<b>5.</b>	<b>Documentos y esquemáticos del hardware</b>	<b>26</b>
5.1.	Herramientas de diseño . . . . .	26
5.2.	Esquemáticos y componentes . . . . .	26
5.2.1.	SBC . . . . .	28
5.2.2.	VLT - Conversor de Voltajes . . . . .	29
5.2.3.	SCUI - Lector de tarjetas de contacto e Interfaz de Usuario . . .	31
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 . . . . .	40
6.2.3.	Librerías . . . . .	41
6.3.	Herramientas utilizadas en el desarrollo del sistema . . . . .	41
6.3.1.	Introducción . . . . .	41
6.3.2.	Generación de MLO, u-boot.bin y uImage . . . . .	41
6.3.3.	Generación de FS . . . . .	42
6.3.4.	Croscopilación . . . . .	42
6.3.5.	Depuración de código . . . . .	42
6.3.6.	Librerías . . . . .	42
6.4.	Desarrollo . . . . .	42
6.4.1.	MLO . . . . .	42
6.4.2.	u-boot . . . . .	42
6.4.3.	uImage . . . . .	43
6.4.4.	FileSystem . . . . .	43
6.4.5.	Librerías . . . . .	43
6.5.	Ejecución de programa principal . . . . .	43
6.5.1.	Script para ejecución autónoma . . . . .	43

<b>III</b>	<b>Compras</b>	<b>44</b>
<b>7.</b>	<b>Compras</b>	<b>45</b>
7.1.	SBC . . . . .	45
7.2.	PCBs . . . . .	45
7.3.	VLT . . . . .	46
7.4.	SCUI . . . . .	46
7.5.	Lector-Escritor RFID . . . . .	48
<b>IV</b>	<b>Anexos</b>	<b>52</b>
<b>V</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>53</b>



# Índice de figuras

4.1. Solución considerada 1 . . . . .	11
4.2. Solución considerada 2 . . . . .	11
4.3. Solución considerada 3 . . . . .	12
4.4. Solución considerada 4 . . . . .	12
4.5. Diagrama de bloques de la arquitectura seleccionada . . . . .	13
4.6. Arquitectura de una celda I/O del TXB0108 . . . . .	19
5.1. Esquemático de la placa VLT - Voltage Level Translator . . . . .	30
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

# Índice de cuadros

5.1.	Conector 14x2 Beagleboard – VLT . . . . .	27
5.2.	Conector 20x2 VLT - SCUI . . . . .	28
5.3.	SBC y lista de accesorios . . . . .	28
5.4.	Lista de componentes de la placa de circuito impreso VLT	29
5.5.	Lista de componentes del lector de tarjetas de contacto, SC	31
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
7.1.	SBC . . . . .	45
7.2.	PCBs . . . . .	46
7.3.	VLT . . . . .	46
7.4.	SC . . . . .	47
7.5.	LCD . . . . .	48
7.6.	Inductor + Adaptación . . . . .	49
7.7.	CL RC632 + filtro EMC . . . . .	51

# **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 estandar 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 ".^proxime 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.<sup>a</sup> 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.

# Capítulo 4

## Hardware

### 4.1. Arquitecturas estudiadas

Se definieron varias alternativas como posible solución, y se fueron descartando a medida que se encontraron limitantes o que no se cumplieran los requerimientos exigidos.

A continuación se describen algunas de las arquitecturas consideradas:

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

Tanto el 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).

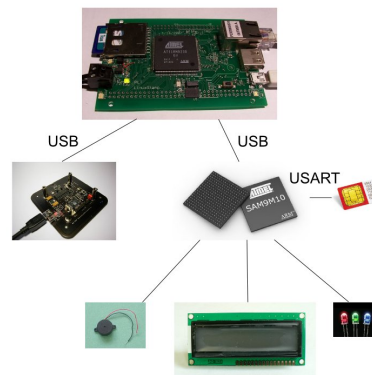


Figura 4.1: Solución considerada 1

Esta arquitectura tiene como ventaja el uso de la SBC que permite instalar un sistema operativo, reutilizar código ya implementado, posee varios puertos de E/S (I2C, USART, SPI, USB, GPIO, etc.), tiene gran capacidad de procesamiento, maneja memoria externa y brinda facilidad para realizar prototipos. Otra ventaja es el uso del microcontrolador que actúa como co-procesador, manejando el resto de los periféricos. Pero tiene como desventaja el costo, el OpenPCD ya es costoso y agregando la SBC es demasiado.

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

El 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.

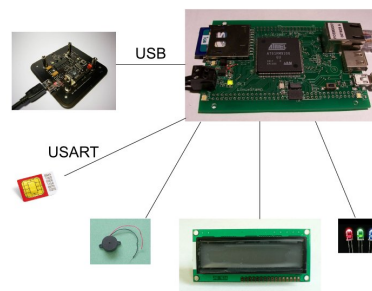


Figura 4.2: Solución considerada 2

### 3 - SBC + lectores de tarjetas + display + buzzer + leds

Todos los periféricos (lectores de tarjetas, display, buzzer y leds) se conectan a la SBC a través de sus interfaces nativas, también el integrado CL RC632 de Philips que maneja la comunicación con las tarjetas RFID. Se diseña la antena para propagar RF.

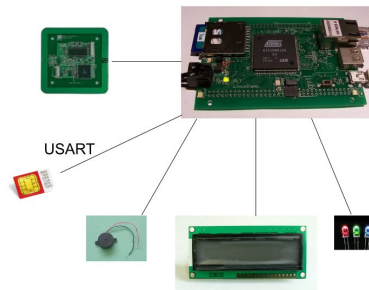


Figura 4.3: Solución considerada 3

### 4 - microcontrolador + lectores de tarjetas + display + buzzer + leds

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. Se prevee el agregado de un modem 3G.

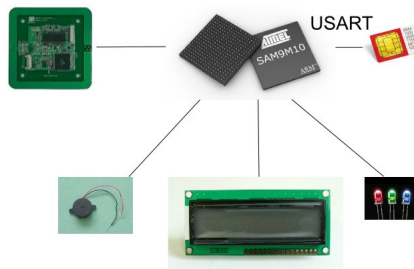


Figura 4.4: Solución considerada 4

## 4.2. Arquitectura seleccionada

Luego de estudiar ventajas y desventajas de las arquitecturas planteadas, y discutirlo con los tutores, se eligieron dos de las posibilidades:

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

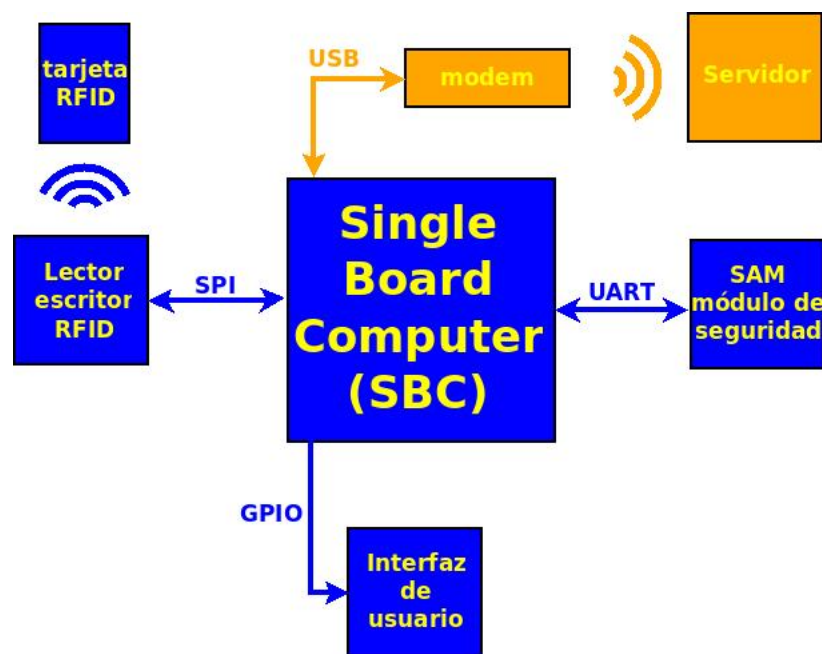


Figura 4.5: Diagrama de bloques de la arquitectura seleccionada

En una primera instancia se pretendía utilizar únicamente el dispositivo OpenPCD, 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 instalarle 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, 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, utilizando para esto el integrado CL RC632 de Philips.

La última opción y la más ambiciosa, plantea el diseño completo de un pcb conteniendo un microcontrolador y memoria capaz de ejecutar un sistema operativo, los lectores de tarjetas, tanto de contacto como RFID, un modem 3G 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 simplemente se diseñó la arquitectura seleccionada, aunque se hicieron pruebas con el OpenPCD nunca se llegó a implementar por completo la arquitectura que lo contiene puesto que el lector-escritor RFID funcionó sin problemas.

## 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 (RC632 de Philips); 20 GPIO para display, leds, buzzer, otros; 2 USB host, uno para la conexión de un módem 3G (intercambio de datos con un servidor central) y otro para aplicaciones futuras. 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 permita 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 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, y se tuvo que diseñar otro módulo por problemas de voltajes. Finalmente, la SBC seleccionada para trabajar fue la BeagleBoard.

### **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 que nos vimos obligados a tomar. Como consecuencia de lo anterior vimos 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 intergrado 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 ten-

sión 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

La SAM es una tarjeta de contacto en la cual corre un sistema operativo y una máquina virtual de java, son también conocidas como java card y se utilizan en aplicaciones donde es necesario generar transacciones seguras. Este módulo permite encriptar datos y generar sesiones seguras con los servidores usados en la infraestructura del STM. Se precisa entonces un lector de tarjetas de contacto (SAM).

La interfaz de usuario se pensó como algo muy básico, que no genere confusiones al usuario durante una transacción y le indique que operaciones se están realizando sobre su tarjeta, como ser: consulta de saldo, incremento de saldo, etc. Para cumplir con lo anterior se optó por emplear un display LCD16x2, tres leds y un buzzer.

---

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 interfaz 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

Si bien se descartó el uso del dispositivo OpenPCD, se toma como ejemplo para el diseño del lector-escritor de tarjetas RF ya que el mismo se apega a las reglas de diseño que establece el fabricante del integrado RC632. Para detalles a tener en cuenta en la realización de una antena RF, ver Anexo I.

---

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 filtro EMC, la 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 contiene un microcontrolador y memoria que son capaces de correr un sistema operativo, en este caso se usará la distribución Angström de Linux, la cual está orientada 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 nuestra aplicación usaremos 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. Por último se usará uno de los puertos USB para agregar un modem 3G que permita la conexión inalámbrica con un servidor para el intercambio de datos.

#### **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 en el caso que se encuentra conectado al IC 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, ahorrándonos pines de control que no tenemos disponibles en la Beagleboard. En la figura debajo podemos observar como está constituido 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 usa 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.

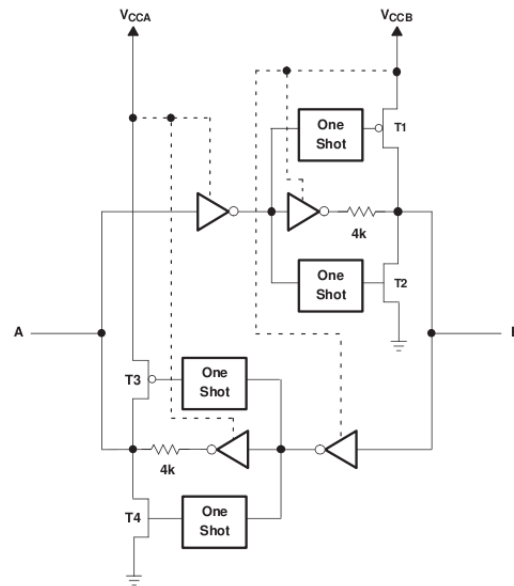


Figura 4.6: Arquitectura de una celda I/O del TXB0108

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

Las tarjetas de contacto que son empleadas para usos en telefonía celular (SIM) así como también las empleadas en aplicaciones de seguridad (SAM) están formadas por un microcontrolador y la comunicación con el mundo exterior la hacen a través de un puerto UART half duplex. En nuestro diseño está contemplada la conversión de full duplex a half duplex para poder interconectar la tarjeta de contacto a la SBC cuyo puerto UART es full duplex. Este tipo de tarjetas se operan mediante el uso de comandos APDU, donde la misma responde a cada comando que es enviado desde el lado del terminal. La tarjeta sólo envía una respuesta de manera espontánea, llamada ATR (Answer To Reset), para indicar que ya está inicializada y lista para operar. En esta respuesta envía parámetros al terminal como ser la tasa en bps a la que puede transferir los datos, etc. La tarjeta nunca inicia la comunicación, actúa siempre como esclavo del terminal. La tarjeta que emplearemos en esta aplicación es del tipo SAM, los comandos APDU para operar con la tarjeta son específicos para la aplicación del STM. Mediante estos comandos es posible abrir sesiones seguras con los servidores del STM, generar las claves de lectura y escritura que luego son usadas para la comunicación con las tarjetas RF,

encriptar datos a ser enviados a los servidores, etc. Las tarjetas de contacto (SAM) son suministradas por la Intendencia de Montevideo y sólo sirven para operar con tarjetas RF de testing.

El display LCD16x2 está basado en un controlador de Hitachi, el HD44780, que permite enviar comandos de control, o instrucciones de lectura-escritura a través de su puerto de entrada paralelo. Una vez que es enviada la secuencia de inicialización del display el mismo queda listo para operar, luego es posible enviar comandos para ubicar el cursor en el lugar deseado o enviar los caracteres ASCII que formarán los mensajes a ser desplegados para el usuario. Los leds, al igual que el buzzer, tienen la función de complementar los mensajes mostrados por el display. El led verde indica que la transacción se efectuó correctamente, a la vez que se emite un pulso sonoro por el buzzer. El led rojo indica que ocurrió un error, a la vez que el buzzer emite varios pulsos sonoros. El led amarillo permanece encendido mientras no haya conexión con el servidor y por tanto no se podrá operara con el dispositivo.

---

### **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 no contar 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 carácter ASCII a ser almacenado en la memoria interna. 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 la señal 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 describiremos 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  $\mu$ -procesador. 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  $\mu$ -procesador. 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  $\mu$ -Processor.

### **Interrupciones**

El RC632 indica ciertos eventos estableciendo el bit IRQ en el registro PrimaryStatus, y además, por la activación del pin IRQ. La señal en el pin IRQ se puede utilizar para interrumpir un  $\mu$ -procesador. 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 RC632 informa al  $\mu$ -procesador 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 estandar 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 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 describiremos 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 muy bien detallado 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 debe 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 nuestro 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

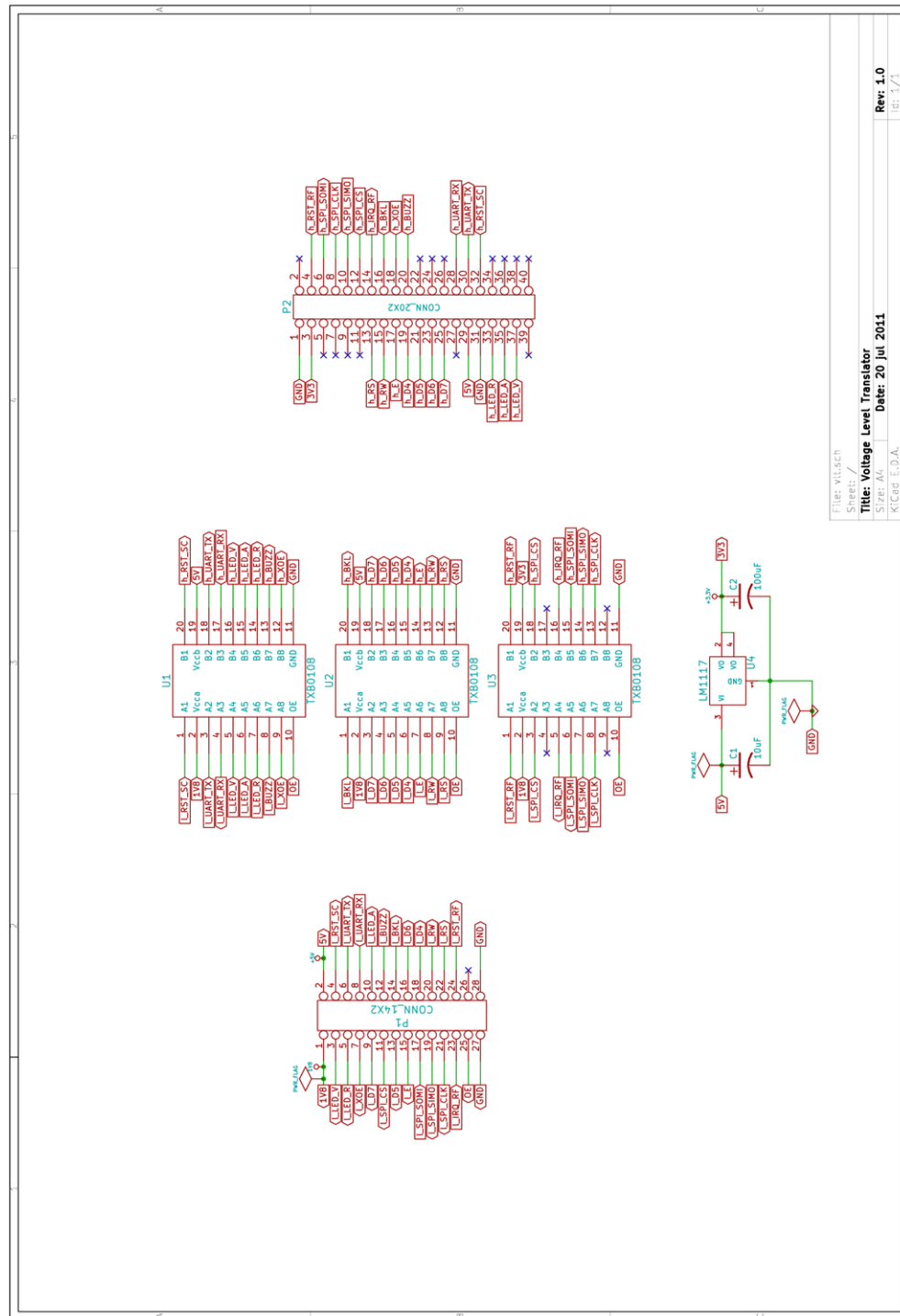


Figura 5.1: Esquemático de la placa VLT - Voltage Level Translator



### 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



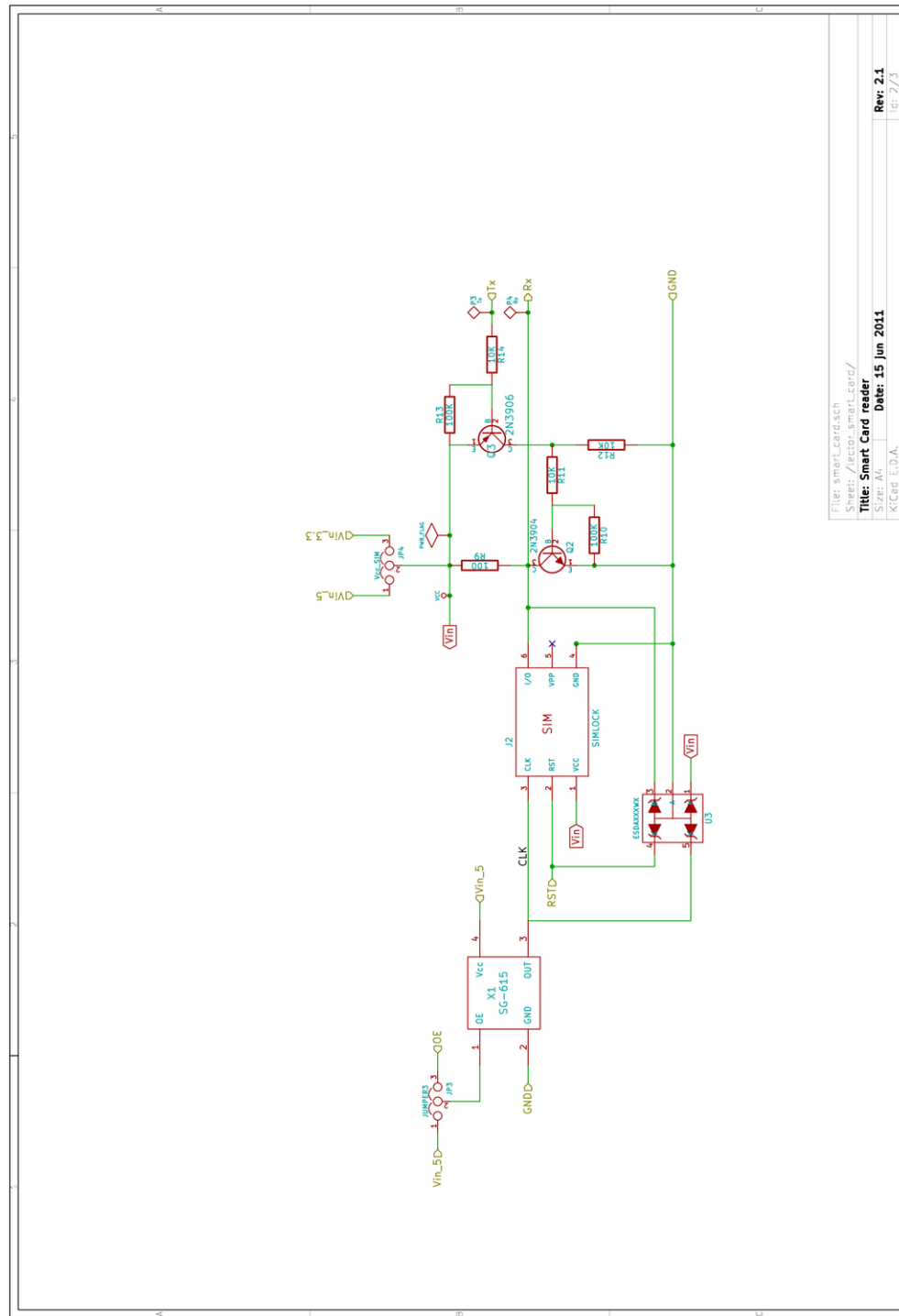


Figura 5.3: Esquemático del lector de tarjetas de contacto, incluido en la placa SCUI

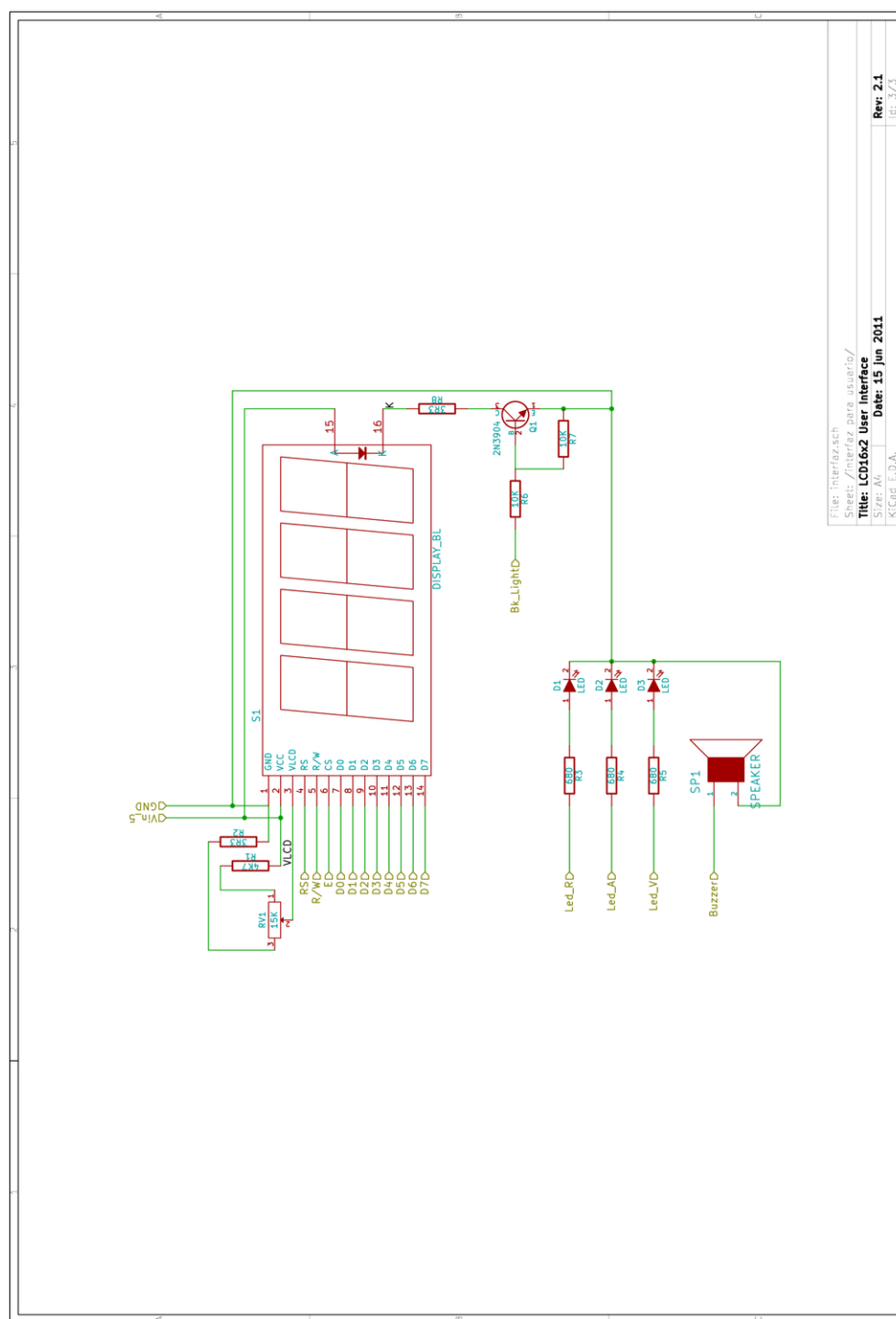


Figura 5.4: Esquemático de la interfaz de usuario, incluido en la placa SCUI

#### 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 ISO14443	SO32	CL RC632
U2	Crystal Oscil- lator, HC49 US 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

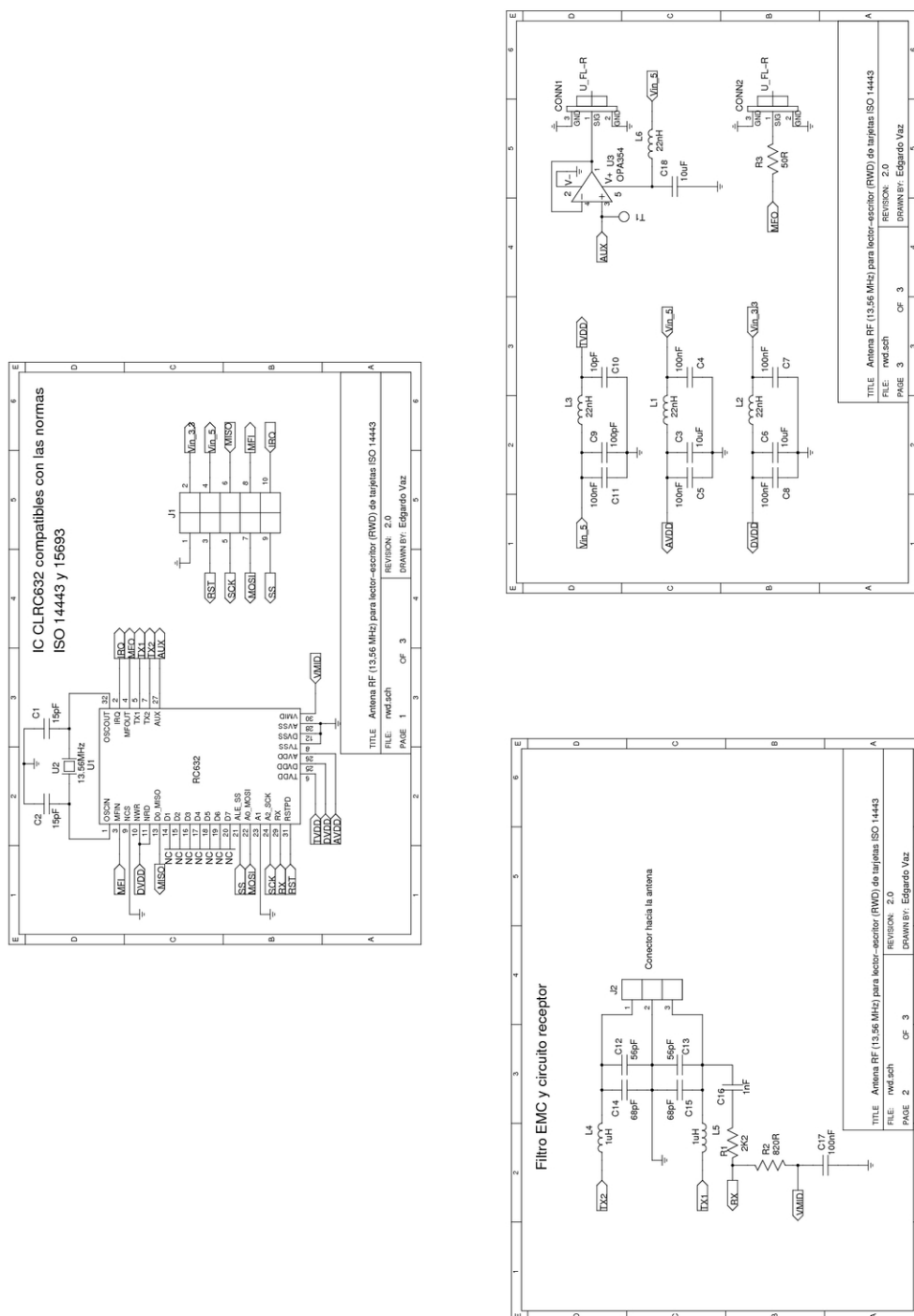


Figura 5.5: Esquemático del módulo digital del lector escritor RFID

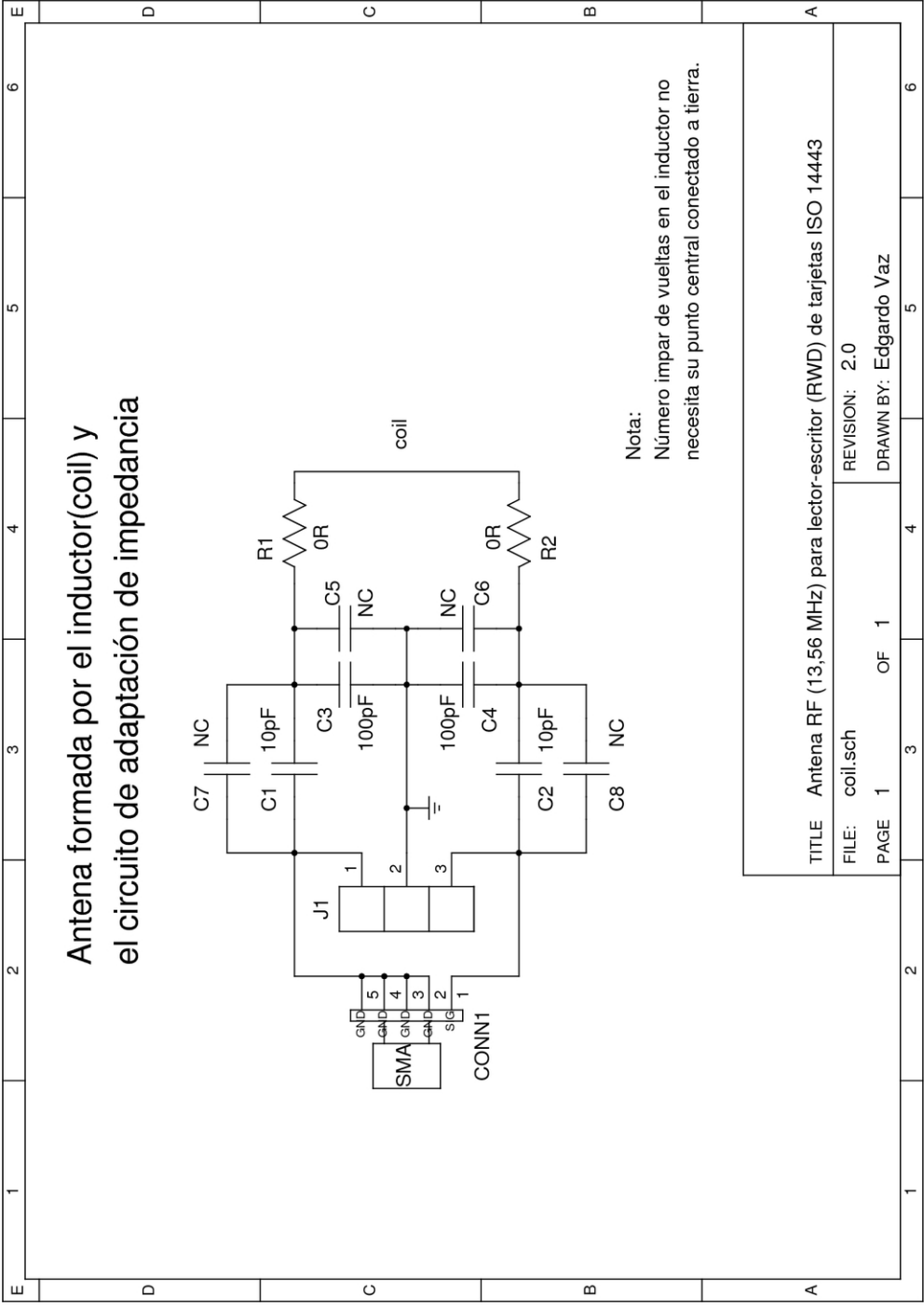


Figura 5.6: Esquemático de la antena RFID, Inductor + Adaptación de impedancia



# Capítulo 6

## Software

### 6.1. Introducción

Todo el desarrollo de software se basó exclusivamente en herramientas de software libre. Para el sistema desarrollado, se eligió una distribución linux en donde se ejecuta la aplicación principal y para la cual se desarrollaron en lenguaje C todos los controladores para el manejo adecuado de los dispositivos periféricos.

### 6.2. Arquitectura de Software

#### 6.2.1. Descripción

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

[En general el desarrollo se realiza en una computadora (host) con una arquitectura distinta de la del dispositivo objetivo (target). En nuestro caso el host es una computadora personal con arquitectura x86 y el target es la beagleboard con arquitectura ARM.]

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 ejecuta-

bles entre otros. OpenEmbedded utiliza Bitbake para su objetivo. Es una herramienta muy potente y difícil de aprender al principio, luego de aprendido su principio de funcionamiento se hace muy simple 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. u-boot**

Como se mencionó anteriormente en el u-boot.bin se realiza la configuración de los pines del bloque de expansión de la beagleboard. “hacer referencia a tabla en algún lado”

Si en “work” no está el directorio u-boot... hacemos lo que sigue

Antes de arrancar a desarrollar se debe ejecutar lo siguiente:

```
$ export BBPATH=/stuff/build:/stuff/openembedded $ export PATH=/stuff/bitbake/bin:$PATH
```

Comenzando el desarrollo: `$ 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`

Nota: Baja los fuentes de la web.

Los fuentes se encuentran en “/stuff/build/tmp/work/beagleboard-angstrom-linux-gnueabi/u-boot.../git/” que contiene un los fuentes del u-boot. Solo nos resta modificar el pinmux y compilar.

Modificación de PINMUX!

```
Compilar: $ 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 realizar el 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/

Nota: Es seguro que el binario generado no se llame exactamente “u-boot.bin” por lo que va a ser necesario renombrarlo para poderlo utilizar en nuestro sistema.

### **6.4.3. uImage**

### **6.4.4. FileSystem**

### **6.4.5. Librerías**

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

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

## **Parte III**

### **Compras**

# Capítulo 7

## Compras

### 7.1. 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 7.1: SBC

### 7.2. 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 7.2: PCBs

### 7.3. 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 7.3: VLT

### 7.4. SCUI

Componente	Descripción	Footprint	Valor	Cantidad	Precio x1	Total
------------	-------------	-----------	-------	----------	-----------	-------



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

Cuadro 7.4: SC

Componente	Descripción	Footprint	Valor	Cantidad	Precio x1	Total
R1	Resistor 4K7 1/10W 1 %	1608[0603]	4,7KW 1/10W 1 %	1	0,05	0,05
R2, R8	Resistor 3R3 1/10W 1 %	1608[0603]	3,3W 1/10W 1 %	2	0,09	0,18
R3, R4, R5	Resistor 680R 1/10W 1 %	1609[0603]	680W 1/10W 1 %	3	0,05	0,15

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

Cuadro 7.5: LCD

## 7.5. 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 7.6: 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, C5, C7, C8, C11, C17	Capacitor	1608[0603]	100nF, Ceramic X7R, 10 %	6	0,074	0,444

C3, C6, C18	Capacitor	1608[0603]	10uF, Ceramic X5R, 20 %	3	0,195	0,585
L1, L2, L3, L6	Inductor	2012[0805]	22nH, 700mA, 5 %	4	0,454	1,816
L4, 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 ISO14443	SO32	CL RC632	1	14,22	14,22
U2	Crystal Oscil- lator, HC49 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, CONN2	U.FL-R Con- nector	U.FL-R- SMT	-	2	1,76	3,52
J1	HEADER, 10WAY, 2ROW	T H Pitch 2,54	10 pines	1	0,389	0,389

J1b	RECEPTACLE, 10WAY, 2ROW	SMD Pitch 2,54	10 pines	1	2,27	2,27
						29,23

Cuadro 7.7: CL RC632 + filtro EMC

## **Parte IV**

### **Anexos**

# **Parte V**

## **Bibliografía**