

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA-ELECTRICISTA



**DISEÑO DE CERRADURA ELECTROMECAÁNICA CON  
CONTROL RFID**

ALUMNO: MAURO FERREYRA

CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA-ELECTRICISTA

DIRECTOR DEL PROYECTO: INGENIERO CÉSAR REALE

CÓRDOBA

AÑO 2016



## **Prólogo**

Cerraduras electrónicas existen de todo tipo: para apertura y cierre de puertas de automóviles, para los hoteles, también para algunos sistemas de seguridad como cajas fuertes.

Para que la electrónica de una cerradura sea fiable debe estar diseñada y realizada específicamente para la tarea que debe desempeñar, y su manejo debe ser sencillo e intuitivo.

El objetivo de este proyecto integrador es el desarrollo de una cerradura electrónica para aplicación doméstica o profesional, partiendo de la base de una cerradura mecánica estándar, lo que ofrecerá la ventaja de no tener que realizar ninguna modificación en la puerta donde irá colocada, distinguiéndose así de las cerraduras eléctricas existentes actualmente.

# Índice

## Contenido

<b>PRÓLOGO</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
<b>OBJETIVOS DEL PROYECTO</b> .....	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 1: PREDISEÑO</b> .....	<b>10</b>
1.1 DISEÑO DEL ELECTROIMÁN .....	11
1.2 CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DEL ELECTROIMÁN DISEÑADO .....	19
<b>CAPÍTULO 2: DISEÑO ELÉCTRICO</b> .....	<b>26</b>
2.1 GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DE LECTOR .....	27
2.2 DISEÑO DE UN LECTOR RFID 125KHZ .....	29
2.2.1 <i>Diseño alto nivel</i> .....	29
2.2.2 <i>Distintas propuestas para modificar el circuito</i> .....	32
2.3 ELEMENTOS ESPECÍFICOS DEL CIRCUITO .....	33
2.3.1 <i>Etapa de transmisión - Bobina de choque y amplificación de señal</i> .....	33
2.3.2 <i>Etapa de filtrado</i> .....	36
2.3.3 <i>Etapa de creación de datos</i> .....	37
2.3.4 <i>Interpretación de los datos y modulación de código Manchester</i> .....	39
2.3.5 <i>Protocolo EM4100</i> .....	40
2.4 DISEÑO DE CIRCUITO GENERAL .....	42
2.4.1 <i>Funcionamiento de la cerradura</i> .....	43
2.4.2 <i>Funciones para mejorar el proyecto</i> .....	46
2.4.3 <i>Diseño propiamente dicho</i> .....	51
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO MECÁNICO DE LA CERRADURA</b> .....	<b>54</b>
3.1 DESCRIPCIÓN CERRADURA MODELO ESTÁNDAR.....	55
3.2 DISEÑO DE LA CERRADURA CON ACCIONAMIENTO ELECTROMECAÁNICO .....	57
3.2.1 <i>Modo de funcionamiento: Cierre</i> .....	62
3.2.2 <i>Modo de funcionamiento: Apertura</i> .....	65
3.2.3 <i>Consideraciones generales</i> .....	68
3.2.4 <i>Componentes necesarios</i> .....	69
<b>CAPÍTULO 4: SOFTWARE</b> .....	<b>72</b>
4.1 DESCRIPCIÓN DE MICROCONTROLADOR USADO .....	73
4.2 DIAGRAMA DE FLUJO .....	74
4.3 FUNCIONES .....	76
4.3.1 <i>Función buscar posición vacía</i> .....	76
4.3.2 <i>Función buscar tarjeta</i> .....	77
4.3.3 <i>Función agregar tarjeta</i> .....	78
4.3.4 <i>Función borrar tarjeta</i> .....	78
4.3.5 <i>Función abrir cerradura</i> .....	79
4.3.6 <i>Función cerrar cerradura</i> .....	79

4.3.7 Parte de función principal.....	80
<b>CAPÍTULO 5: FABRICACIÓN PROTOTIPO .....</b>	<b>83</b>
5.1 CONJUNTO CERRADURA .....	84
5.2 PARTE MECÁNICA .....	85
5.3 ARMADO ELÉCTRICO.....	91
5.4 PRUEBAS DE LA CERRADURA .....	97
5.4.1 Consumo eléctrico en stand-by.....	97
5.4.2 Cálculo de disipador en integrados 78XX.....	98
5.4.3 Características de electroimanes principales y electroimán auxiliar.....	102
5.4.4 Cálculo del mecanismo de cerradura.....	105
<b>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES FINALES .....</b>	<b>111</b>
6.1 ANÁLISIS DE COSTOS.....	112
6.1.1 Costos parte mecánica.....	112
6.1.2 Costos parte eléctrica.....	113
6.1.3 Costo total producto .....	114
6.2 CONCLUSIONES FINALES .....	114
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>116</b>

## **Agradecimientos**

*Finalizar este proyecto significa concluir la que es hasta ahora la etapa más importante de mi vida, compartiendo momentos con amistades que durarán para siempre.*

*Gracias a la formación brindada por esta Facultad, podré desarrollar mi tarea como profesional en el ámbito laboral que considere más adecuado, con total respeto hacia la sociedad que me ha permitido realizar esta carrera de grado.*

*Quiero agradecer a mi familia que me apoyó durante toda la carrera brindándome apoyo económico y moral en estos largos años, especialmente a mi madre, Marina Julia Borri, y mi padre, Héctor Daniel Ferreyra. También a mis amigos y compañeros que me acompañaron y alentaron de forma desinteresada para llegar a la meta, y a todas aquellas personas que me ayudaron directa o indirectamente a finalizar esta etapa.*

*Además agradezco a todos los profesores que he tenido el placer de conocer, en especial al Ingeniero César Reale, Director del Proyecto, y al Ingeniero Eloy Villafañe, Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Electricista, por su ayuda incondicional y su incansable apoyo para permitirme finalizar el proyecto.*

*También agradezco especialmente al Ingeniero Alejandro Ramírez, por su inestimable ayuda y consejo, sin los cuales no habría podido encarar este trabajo. Así como a mi amigo Andrés Oser, por su auxilio inmediato en un momento de necesidad.*

*Finalmente agradezco profundamente a esta casa de altos estudios, la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, perteneciente a la Universidad Nacional de Córdoba, por permitirme ser Ingeniero, y de la cual estoy orgulloso de pertenecer.*

## Introducción

Se utilizan productos electrónicos todos los días, y cada día más. Y, sin embargo, todavía existen prejuicios sobre su fiabilidad. En el caso de las cerraduras, por ejemplo, siempre hay alguien dispuesto a declarar que “las mecánicas son más fiables”. En realidad, hoy en día fabricar cerraduras electrónicas fiables como las mecánicas, pero más cómodas y seguras, es posible.

La electrónica, nacida a principios del siglo XX, ya tiene más de un siglo de vida. A la electrónica confiamos nuestra seguridad cuando viajamos en automóvil, por no mencionar aviones o barcos. Todos los diagnósticos médicos avanzados se realizan con instrumentos electrónicos. Prácticamente todas las personas llevan en el bolsillo sofisticados teléfonos inteligentes que todavía funcionan perfectamente incluso después de varias caídas, y si algo se rompe suele ser una parte mecánica, como la carcasa o el cristal. En definitiva, no se deberían necesitar grandes pruebas de la fiabilidad que ha alcanzado la electrónica. Aún así, siendo una tecnología más compleja y menos "comprensible" que la mecánica, siempre queda alguna duda.

En realidad un sistema electrónico, cuando está diseñado y realizado a la perfección, alcanza excelentes estándares de fiabilidad, y un fallo del mismo es un evento tan raro que pasa a un segundo plano en comparación con las ventajas que esta tecnología ofrece.

En el caso de una cerradura, existe la posibilidad de eliminar la llave y el problema de su gestión, aperturas de distintos usuarios con diferentes combinaciones o con lectores biométricos, posibilidad de registrar las operaciones realizadas, aperturas temporizadas, etc. Estas son solo algunas de las funciones que una cerradura electrónica permite y una mecánica no. De esta manera se observa que ofrece más funciones en términos de seguridad y comodidad.

Ahora, cerraduras electrónicas existen de todo tipo: para apertura y cierre de puertas de automóviles, para los hoteles, incluso para algunos sistemas de seguridad como cajas fuertes.

Pero para que la electrónica de una cerradura sea fiable debe estar diseñada y realizada específicamente para la tarea que debe desempeñar, ya que ha de cumplir con varios requisitos especiales, tales como:

- Debe consumir poco, para que no sea necesario cambiar las pilas con frecuencia, y el consumo ha de ser constante, sin saltos, para evitar que las pilas se agoten de golpe sin dejar tiempo para cambiarlas. Además, debería contar con un indicador del estado de carga de la batería.

- Debe existir la posibilidad de alimentar el circuito de forma auxiliar, en caso que nos hayamos quedado sin batería.

- Debe estar protegida contra la inversión accidental de la polaridad de las pilas, para que no se dañe si nos equivocamos al ponerlas.

- Su manejo debe ser sencillo e intuitivo.

El objetivo de este proyecto integrador es el desarrollo de una cerradura electrónica sobre la base de una cerradura mecánica estándar, lo que ofrecerá la ventaja de no tener que realizar ninguna modificación en la puerta donde irá colocada, distinguiéndose así de las cerraduras eléctricas existentes actualmente. Este hecho permitiría a un cerrajero, ofrecer la alternativa entre una cerradura mecánica y una electrónica con las ventajas ya detalladas para el caso de la electrónica.

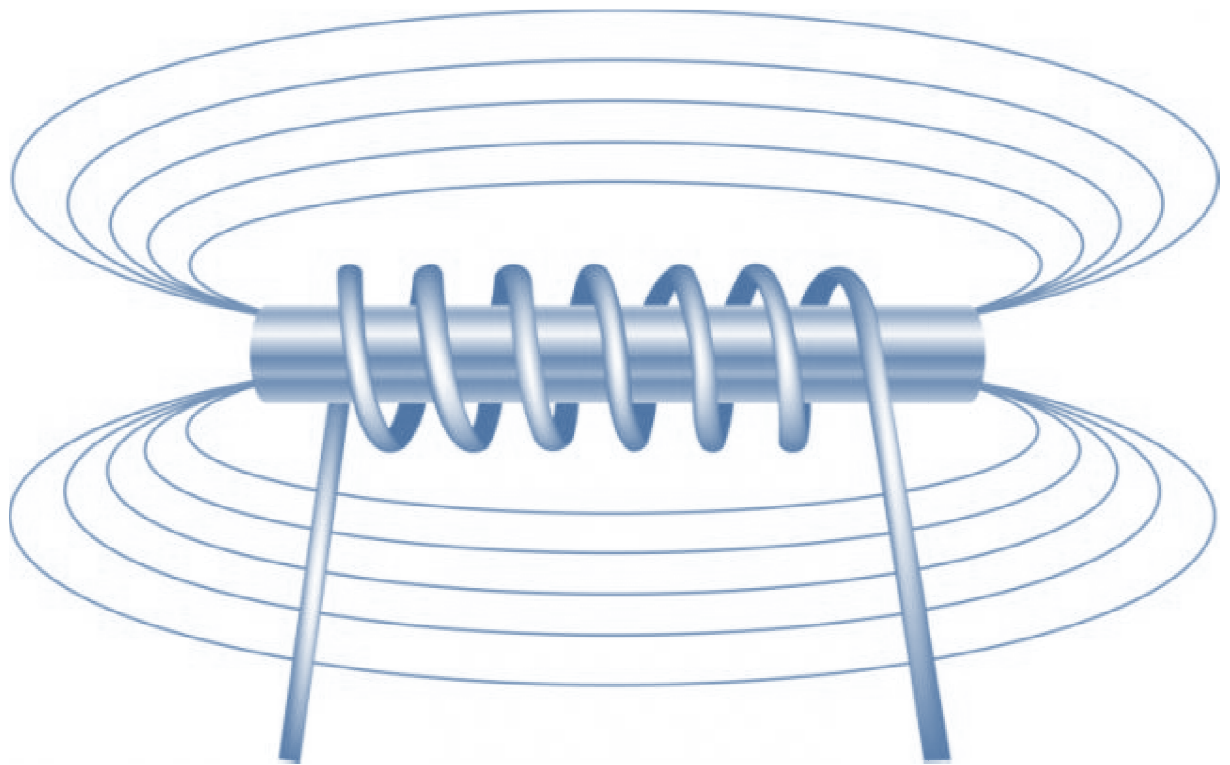


## Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo principal el diseño de una cerradura electromecánica con control RFID (Radio Frequency IDentification, identificación por radio frecuencia) para ser utilizada como reemplazo de las actuales cerraduras de tipo residencial. Para lograrlo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En el capítulo 1 se realizará un prediseño, en donde se analizarán los requisitos que han de cumplir los distintos componentes, y el modo de funcionamiento del dispositivo. Aparte se realizarán cálculos y estimaciones necesarias para seguir con el diseño. Como consideración importante se ha partido de realizar el diseño con la base de utilizar las dimensiones de una cerradura estándar, específicamente la cerradura marca Acytra modelo 101, con la pauta de no realizar adaptaciones o modificaciones en la puerta al colocar esta nueva cerradura.
- Capítulo 2 de diseño electrónico, en el cual se presenta el circuito para la lectura de las tarjetas RFID, y además el circuito de control de la cerradura.
- Capítulo 3 de diseño mecánico, en donde se completa el diseño de la cerradura en su totalidad, junto a los cálculos de los diferentes componentes del conjunto.
- Capítulo 4 de software, en el que se explica el código utilizado.
- Capítulo 5 de construcción del prototipo.
- Capítulo 6 de análisis y conclusiones finales.

## Capítulo 1: Prediseño

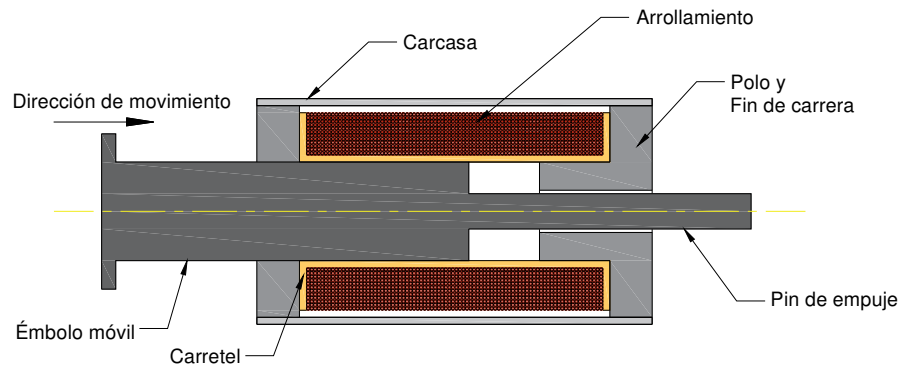


## Capítulo 1: Prediseño

En este capítulo se dictan los lineamientos generales a seguir para el desarrollo del diseño final, y la posibilidad de fabricación de un prototipo con funcionalidad satisfactoria.

### 1.1 Diseño del electroimán

Un solenoide es un dispositivo electromagnético que convierte energía eléctrica en energía mecánica (en este caso un movimiento lineal), utilizado para mover una carga externa una distancia específica. La corriente que circula a través del arrollamiento crea un campo magnético que produce una atracción entre un émbolo móvil y un polo fijo. Cuando una fuerza electromotriz es aplicada, el émbolo del solenoide y su carga externa se aceleran y mueven a través del solenoide hasta que ocurre el impacto en el polo. El émbolo es guiado en el interior del arrollamiento por el carretel en el que el arrollamiento está bobinado. Este carretel puede ser de material plástico o de algún material no magnético. Al desaparecer la fuerza electromotriz lo mismo ocurre con la intensidad de corriente a través de la bobina. De esta manera, el émbolo, junto a su carga externa, vuelve a su posición de reposo, ayudado por un mecanismo de resorte, por fuerzas gravitatorias, o por la carga misma. Los efectos del magnetismo residual (la fuerza magnética remanente luego de que el electroimán fue desenergizado) debe mantenerse en el mínimo posible, mediante la adecuada selección del material del émbolo y de los polos. Todos los tipos de solenoide lineal son dispositivos de atracción, en el sentido de que el émbolo es atraído hacia dentro hasta llegar al tope en el interior del electroimán cuando el mismo está energizado. Sin embargo, si este émbolo es adaptado para incluir una barra de empuje, que pase a través de un agujero pasante en el polo de fin de carrera, cuando el émbolo es atraído, la barra de empuje puede ser usada para empujar una carga externa una distancia específica. Por lo tanto, un solenoide puede ser usado tanto para atraer como para empujar una carga. En la Figura 1-1 se observa lo dicho anteriormente.

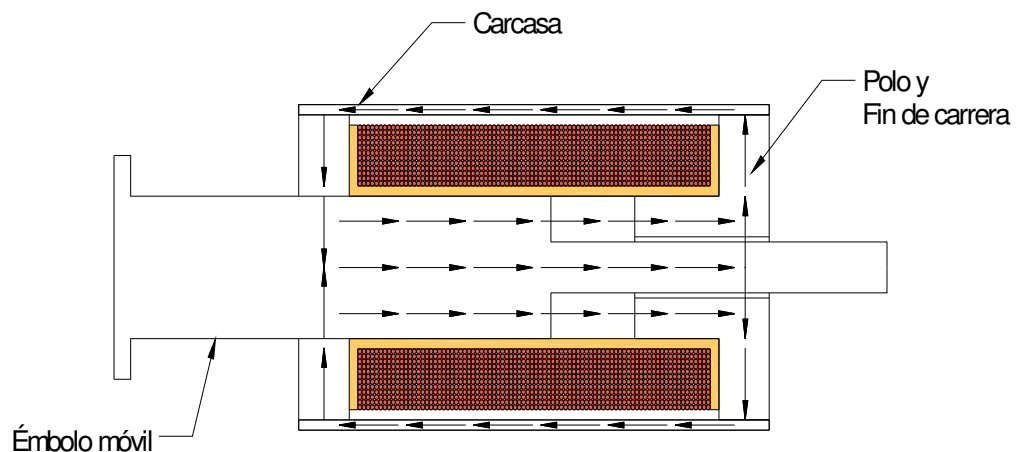


**Figura 1-1. Esquema de solenoide lineal de tracción**

El circuito magnético del solenoide es el camino de las líneas de flujo magnético a través de un medio metálico (hierro), tanto como el aire. El patrón de estas líneas es toroidal. Las líneas de flujo pasan por el exterior del arrollamiento a través de la carcasa metálica y se concentran en el núcleo del mismo en donde el émbolo se mueve. La eficiencia magnética del solenoide es determinada por la longitud del camino, el entrehierro del circuito magnético y la permeabilidad del material. Por ello la utilización de la carcasa, la cual brinda un "retorno" de las líneas de flujo a través de un material de alta permeabilidad, en vez de a través del aire, disminuyendo de esta manera la reluctancia.

Todos los solenoides tienen un entrehierro de longitud variable entre el émbolo móvil y el polo de fin de carrera, este entrehierro determina la carrera máxima del electroimán. Pero se debería poner énfasis en evitar otro entrehierro que disminuya la eficiencia de nuestro circuito magnético, por lo que se utiliza la carcasa, los polos y el émbolo mismo para este objetivo.

En la Figura 1-2 se muestra el circuito magnético en el solenoide.



**Figura 1-2. Circuito magnético en solenoide lineal.**

Los datos iniciales para el comienzo del diseño del electroimán de la cerradura a desarrollar son:

Tensión de alimentación adoptada = 12V (Voltios)

Intensidad de corriente circulante deseada = 1000mA (mili Amperes)

Tamaño máximo mm (ancho x profundidad x largo ) = 14 x 14 x 25

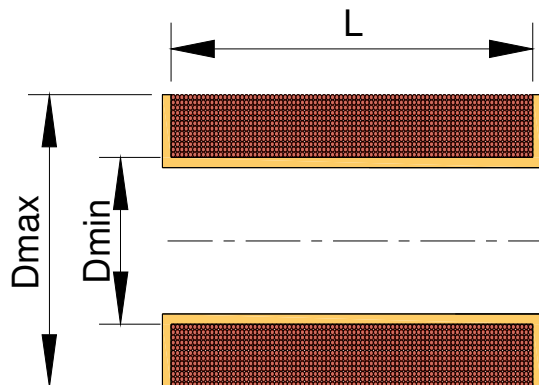
Según el tamaño máximo permitido para colocar el solenoide dentro de la cerradura, el arrollamiento cumplirá las siguientes condiciones:

$D_{max} = 14\text{mm}$

$D_{min} = 8\text{mm}$

Largo L que debe ser 25mm como máximo según lo dicho anteriormente.

En la Figura 1-3 se esquematiza el arrollamiento del solenoide.



**Figura 1-3. Arrollamiento del solenoide lineal, se observa el portabobina y el alambre de cobre**

La resistencia (R) del alambre de cobre esmaltado utilizado para realizar el electroimán se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$R = \rho * \frac{l_m}{S} * N \tag{1.1}$$

En donde

$\rho = \text{resistividad del cobre, en } \frac{\Omega * \text{mm}^2}{\text{m}}$

$l_m = \text{longitud de la espira media, en m}$

$S = \text{área del conductor, depende del calibre seleccionado, en } mm^2$

$N = \text{número de vueltas del arrollamiento}$

Además, según la ley de Ohm

$$V = I * R \quad (1.2)$$

Reemplazando (1) en (2) y despejando el número de vueltas, se obtiene la siguiente ecuación

$$N = \frac{V}{I} * \frac{S}{\rho * l_m} \quad (1.3)$$

Luego, reemplazando los valores conocidos (tensión de alimentación, intensidad de corriente, resistividad y longitud de la espira media) se puede calcular el número de vueltas del arrollamiento en función de la sección (del calibre que sea seleccionado)

$$N = \frac{12}{1} * \frac{S}{0,02 * 0,0345} = 17391 * S$$

Como se ve en el resultado anterior, existe un número de vueltas determinado para cada calibre que sea seleccionado. La solución pasa por limitar el número de vueltas a un número razonable. En este caso se considera que el bobinado no debería pasar de las 1500 vueltas. En este caso:

$$N = 17391 * S \leq 1500 \text{ Por lo tanto}$$

$$S \leq \frac{1500}{17391} = 0,086 mm^2$$

Observando el resultado anterior, la sección del conductor deberá ser menor a  $0,086 mm^2$ .

A continuación se presenta la Tabla 1, la cual posee las dimensiones comerciales de alambre de cobre esmaltado, tanto en calibre (AWG, American Wire Gauge), diámetro del conductor (en mm) y sección del conductor (mm<sup>2</sup>). Se observa que los calibres que satisfacen la condición anterior son los n° 28, 29 y 30.

**Tabla I. Calibres de alambre de cobre esmaltado**

AWG	Diam. mm	Área mm <sup>2</sup>	AWG	Diam. mm	Área mm <sup>2</sup>
1	7.35	42.40	16	1.29	1.31
2	6.54	33.60	17	1.15	1.04
3	5.86	27.00	18	1.024	0.823
4	5.19	21.20	19	0.912	0.653
5	4.62	16.80	20	0.812	0.519
6	4.11	13.30	21	0.723	0.412
7	3.67	10.60	22	0.644	0.325
8	3.26	8.35	23	0.573	0.259
9	2.91	6.62	24	0.511	0.205
10	2.59	5.27	25	0.455	0.163
11	2.30	4.15	26	0.405	0.128
12	2.05	3.31	27	0.361	0.102
13	1.83	2.63	28	0.321	<b>0.0804</b>
14	1.63	2.08	29	0.286	<b>0.0646</b>
15	1.45	1.65	30	0.255	<b>0.0503</b>

Selección calibre 28, de acuerdo con la tabla 1:

$$N = 17391 * S = 17391 * .0804 = 1398 \approx 1400$$

La cantidad de capas en sentido diametral se calcula como

$$N_y = \frac{D_{max} - D_{min}}{2 * d}$$

En donde "d" es el diámetro de alambre del calibre seleccionado.

Luego

$$N_y = \frac{14 - 8}{2 * 0,321} = 9,3 \cong 10$$

Ahora la cantidad de capas en el sentido longitudinal se calcula según:

$$N_x = \frac{N}{N_y} = \frac{1400}{10} = 140$$

De esta manera se puede calcular la longitud del arrollamiento como

$$L = N_x * d = 140 * 0,321 = 45mm$$

Como puede verse con este calibre no se satisface la condición de largo del solenoide, aunque si se adoptase  $L=22,5mm$  la cantidad de vueltas sería la mitad, por lo que la resistencia también, incrementándose la corriente al doble (2A). La fuerza que posee el solenoide depende de la relación  $I*N$ , en donde  $I$  es la intensidad de corriente y  $N$  la cantidad de espiras. Por lo tanto se puede mantener la fuerza del mismo disminuyendo su tamaño en longitud, de manera de disminuir el número de vueltas pero incrementándose la corriente circulante en idéntica proporción. La ventaja es que se logró disminuir el tamaño, por lo que es más pequeño, mientras que la desventaja es que la corriente que circulará es mayor, lo que se traduce en un mayor consumo y mayor calentamiento (hasta puede ser que según el calibre seleccionado no permita el paso de esa corriente por un tiempo lo suficientemente largo para que el solenoide actúe resultando en que se pierda la aislación del alambre).

Selección calibre 29:

$$N = 17391 * S = 17391 * 0,0646 = 1123 \approx 1100$$

De la misma manera que en el caso anterior

$$N_y = \frac{14 - 8}{2 * 0,286} = 10,5 \cong 11$$

$$N_x = \frac{N}{N_y} = \frac{1100}{11} = 100$$

$$L = N_x * d = 100 * 0,286 = 28,6mm$$

Con este calibre prácticamente se satisface la condición requerida, por lo que se tendrá en cuenta a la hora de la selección final.

Selección calibre 30:

$$N = 17391 * S = 17391 * 0,0503 = 875 \approx 900$$

De la misma manera que en el caso anterior

$$N_y = \frac{14 - 8}{2 * 0,255} = 11,7 \cong 12$$



$$N_x = \frac{N}{N_y} = \frac{900}{12} = 75$$

$$L = N_x * d = 750 * 0,255 = 19,1mm$$

Este ya satisface las dimensiones máximas requeridas.

Según lo calculado anteriormente, se obtienen las siguientes opciones de arrollamiento:

- Opción 1
  - calibre 28
  - N=700
  - L=22,5mm
  - I=2000mA
- Opción 2
  - calibre 29
  - N=1100
  - L=28mm
  - I=1000mA
- Opción 3
  - calibre 30
  - N=900
  - L=19mm
  - I=1000mA

A continuación se realizará una estimación de la fuerza que generará el electroimán en las distintas posiciones del émbolo.

La fuerza se puede calcular como:

$$F = \frac{(N * I)^2 * \mu_0 * S}{2 * g^2} \quad (1.4)$$

$N$  = número de vueltas del arrollamiento

$I$  = intensidad de corriente en Amperes

$\mu_0$  = permeabilidad absoluta en el vacío =  $4 * \pi * 10^{-7} \text{ N/A}^2$

$S$  = superficie del polo en  $mm^2$

$g = \text{entrehierro en mm}$

- Opción 1

$$F = \frac{(700 * 2)^2 * 4\pi 10^{-7} * \frac{\pi}{4} * 8^2}{2 * g^2} = \frac{61,9}{g^2} \text{ N/mm}^2$$

- Opción 2

$$F = \frac{(1100 * 1)^2 * 4\pi 10^{-7} * \frac{\pi}{4} * 8^2}{2 * g^2} = \frac{38}{g^2} \text{ N/mm}^2$$

- Opción 3

$$F = \frac{(900 * 1)^2 * 4\pi 10^{-7} * \frac{\pi}{4} * 8^2}{2 * g^2} = \frac{25,6}{g^2} \text{ N/mm}^2$$

Se procede a realizar la Tabla II, variando el valor de  $g$  para las distintas carreras del émbolo y multiplicando el resultado por 100 para pasar de unidad a gramos fuerza. La tabla se presenta a continuación.

**Tabla II. Valores de fuerza del electroimán según carrera y opción elegida**

carrera	F <sub>1</sub> gr	F <sub>2</sub> gr	F <sub>3</sub> gr
5	248	152	102.4
4.5	306.16	187.64	126.4
4	387.52	237.52	160
3.5	506.12	310.2	208.96
3	688.88	422.24	284.44
2.5	992	608	409.6
2	1550	950	640
1.5	2755.56	1688.88	1137.76
1	6200	3800	2560

Se observa en la Tabla II que la opción 1 genera la mayor fuerza, la cual será de unos 250gr al comienzo del movimiento y supera los 6000gr llegando al fin de carrera (teóricamente).

## 1.2 Construcción y prueba del electroimán diseñado

El siguiente paso es la construcción del solenoide y la verificación de los valores de fuerza, ya que para el mecanismo de acople se deberá vencer un resorte de compresión, encargado de mantener el mecanismo desembragado.

Para ello lo primero a realizar es la confección de los planos de las distintas piezas, y luego se procede al mecanizado de las distintas partes.

La Figura 1-4 y 1-5 corresponden al primer prototipo de electroimán construido, la primera es del conjunto armado y en la segunda se muestran las piezas separadas. Se observa que el carretel ya está bobinado, por lo que el solenoide está listo para comenzar a realizar pruebas.



**Figura 1-4. Primer prototipo de electroimán, conjunto armado y bobinado**



**Figura 1-5. Primer prototipo de electroimán, piezas separadas**

Las primeras pruebas no fueron muy satisfactorias: se conectaba la bobina a la fuente de 12VDC (12 Voltios, corriente continua), circulaba una corriente en valores esperados el émbolo se desplazaba pero al colocar un resorte muy liviano ya no lo lograba vencer, es decir, la fuerza del émbolo era muy poca, aún para un entrehierro muy pequeño, es decir, no se verificaban los resultados de la Tabla II.

Luego de varias pruebas se procedió a remover la carcasa y los polos, quedando el electroimán comprendido por la bobina, el émbolo y el resorte. En este caso, grata fue la sorpresa cuando se notó que el solenoide atraía el émbolo venciendo al resorte con facilidad.

Luego de esta prueba se agregó la carcasa junto a un polo, logrando de esta manera una fuerza muy superior a la recién observada.

Al agregar nuevamente el otro polo, la fuerza disminuyó drásticamente, igual que en la primera observación. Por lo que el problema debía ser ese polo. El siguiente paso era comprender qué es lo que estaba sucediendo para que se produzca este comportamiento, y tenerlo en cuenta para un diseño definitivo.

Se muestra a continuación la Figura 1-6, en la que se observa la configuración del solenoide en las distintas pruebas realizadas.

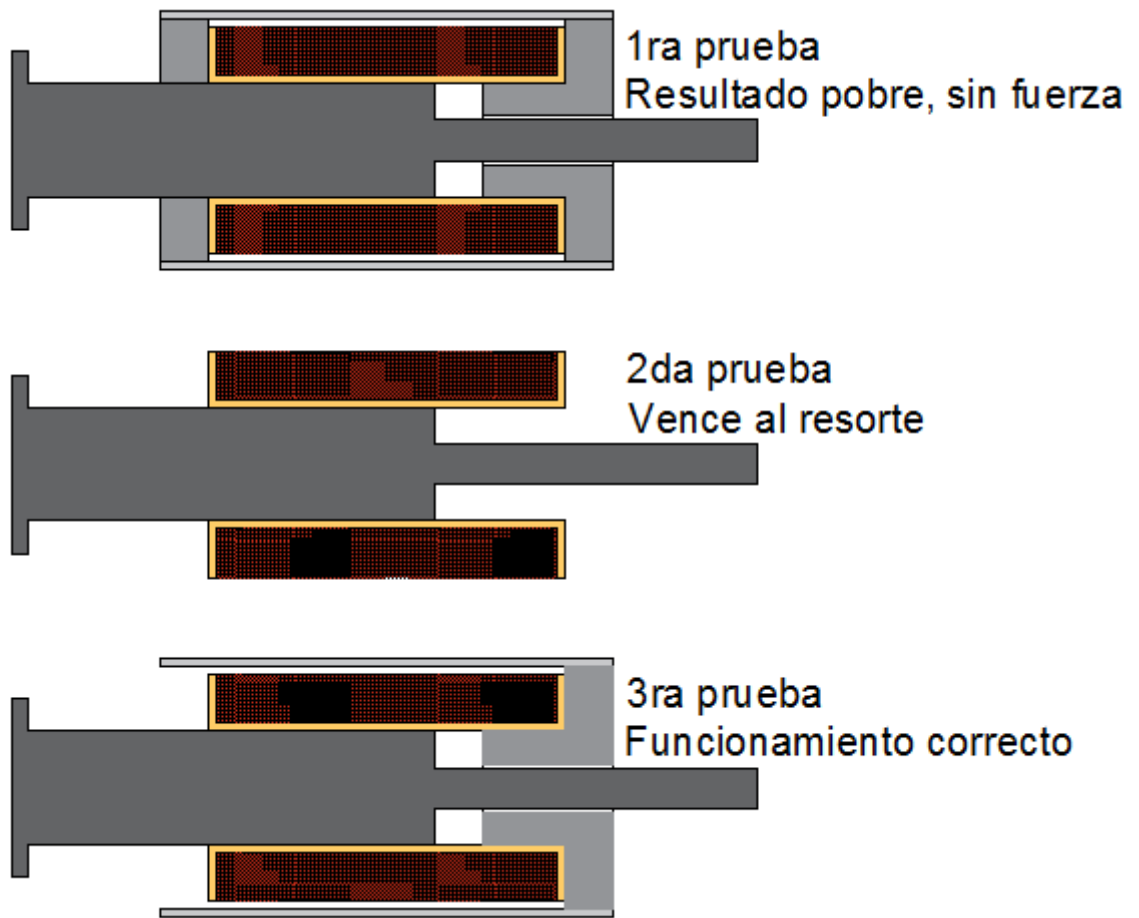


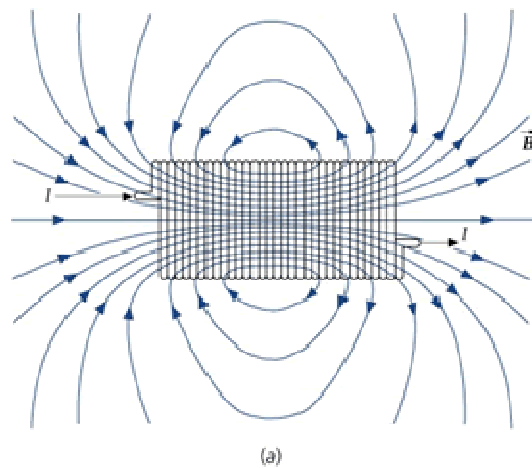
Figura 1-6. Pruebas del electroimán

Se parte desde el momento en que funcionó el solenoide, es decir, en la segunda prueba. ¿Qué es lo que ocurre en realidad? Si se remueve el émbolo, al aplicar circular una corriente por la bobina se generaría un campo magnético  $B$ , el cuál sí es posible calcular de forma teórica, ya que la permeabilidad magnética del aire es prácticamente igual que en el vacío.

Las líneas de flujo del campo magnético a través de la bobina serán como en la Figura 1-7, y el valor de  $B$  en el eje de la misma se calcula con la Ecuación 1.5, que es ni más ni menos que la Ley de Ampere aplicada a un solenoide .

$$B[T] = \frac{\mu_0 * N * I[A]}{L[m]} \quad (1.5)$$

$$B[T] = \frac{4 * \pi * 10^{-7} * 700 * 2}{0,02} = 0,088T$$



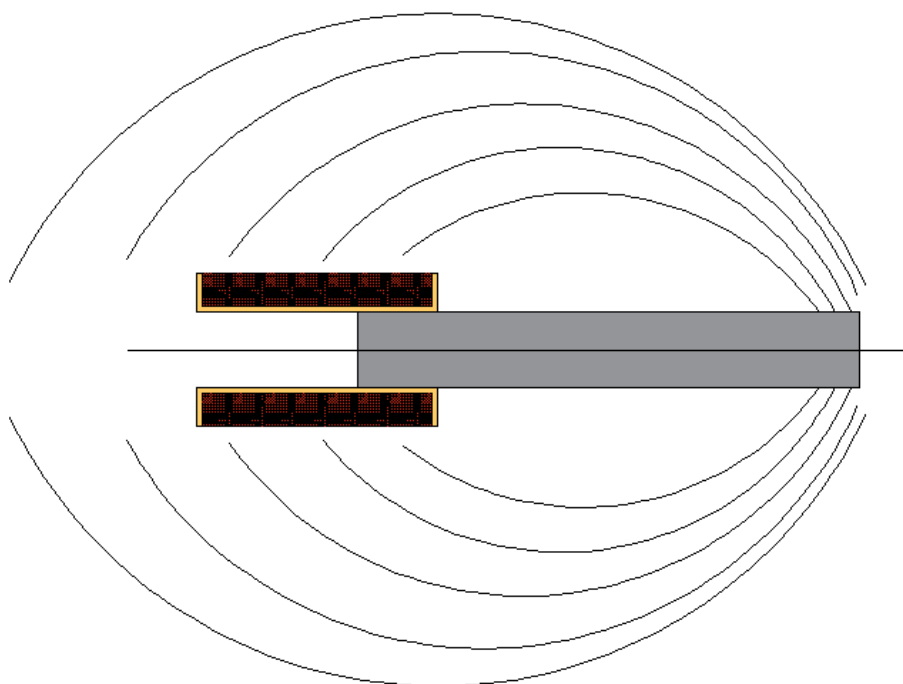
**Figura 1-7. Líneas de flujo del campo magnético**

Se observa en la Figura 1-7 que las líneas de flujo se ordenan al pasar por dentro de la bobina pero al salir del solenoide divergen, toman distintos caminos, hasta volver a entrar del otro lado.

Ahora se realiza la siguiente prueba: se procede a fabricar otro émbolo más largo que el diseñado, de un mismo diámetro en toda su longitud. Al acercarlo por un extremo y energizar la bobina, se observa que el émbolo se mueve hacia el interior del solenoide, pero al pasar el centro del émbolo la posición del centro del solenoide, este se comienza a desacelerar hasta cambiar de sentido de movimiento. Finalmente el émbolo queda centrado en el electroimán y no hay más movimiento del mismo, aunque si se intenta desplazarlo aplicando una fuerza exterior hacia cualquiera de los lados se observa que se genera una fuerza que impide este movimiento.

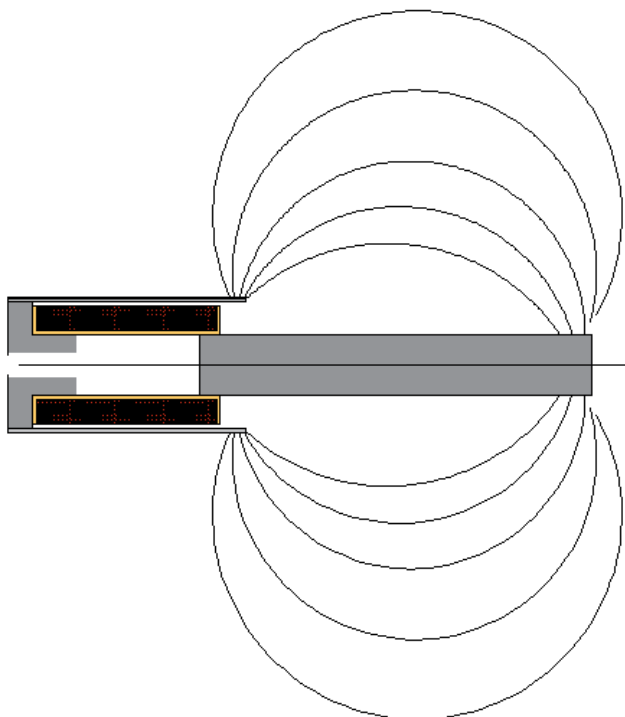
Además, si el émbolo es de un material no magnético, no existe movimiento del mismo (se realizó la prueba con un caño de cobre, pero para aluminio o plástico o cualquier material no ferromagnético sucederá lo mismo).

Luego de realizadas esas observaciones, se concluye que el émbolo se mueve hacia el centro del solenoide para mantener una simetría en las líneas de flujo magnético, es decir, al no estar centrado, se genera una asimetría en las mismas, las cuales estarán teóricamente más concentradas en el lado del émbolo y más dispersas en el lado en que no está. Esta asimetría del campo sería la generadora de la fuerza que impulsa al émbolo a centrarse en el solenoide, ver Figura 1-8.



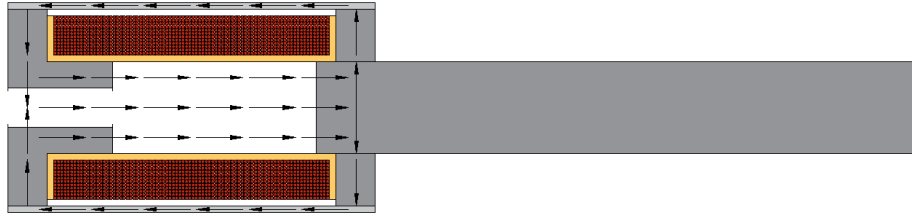
**Figura 1-8. Líneas de flujo magnético distorsionadas por el émbolo**

Al agregar la carcasa y un polo, las líneas de flujo se deformarían aún más, logrando una asimetría mayor que la anterior, se estima que el comportamiento será como el reflejado en la Figura 1-9.



**Figura 1-9. Líneas de flujo magnético distorsionadas por el émbolo y la carcasa**

Finalmente, al agregar el último polo, este provee un camino que hace que las líneas de flujo magnético se cierren de una manera simétrica a través de la carcasa ya completa del electroimán, sin pasar prácticamente a través del émbolo, de esta forma, el émbolo no produce ningún desequilibrio en las líneas de flujo y por lo tanto no se genera ninguna fuerza. Ver Figura 1-10.



**Figura 1-10. Líneas de flujo magnético no distorsionadas por el émbolo**

Luego de realizado el análisis anterior, se concluye lo siguiente:

- Para que ocurra el movimiento del émbolo debe haber una asimetría en las líneas de flujo magnético, de manera que se genere la fuerza que tienda a compensar esa asimetría mediante el desplazamiento del mismo.
- A mayor asimetría de las líneas de flujo, mayor fuerza de atracción.
- La fuerza es más bien un impulso, es decir, si en lugar de un émbolo largo se usa una pequeña pieza de hierro, esta será lanzada por el otro extremo, realizándose un "disparo magnético".

Los resultados obtenidos con el primer prototipo de electroimán construido permiten realizar una modificación en el diseño, de manera de simplificarlo. Se explica a continuación.

Al observar las especificaciones de fabricantes de electroimanes, se nota que los más pequeños (los necesarios en el proyecto, ya que deben entrar en la cerradura que posee 14mm de espesor), poseen una carrera muy limitada, acompañada de una pequeñísima fuerza en esa carrera. A modo de ejemplo el modelo ST1325N de la empresa Bicron tiene un diámetro exterior de 13mm y una longitud de 26mm, a máximo consumo (para pulsos intermitentes) puede realizar una fuerza máxima de 100gr a una distancia máxima de 8mm. Es debido a esto, que el solenoide se pensaba utilizar en un mecanismo de embrague, el cual necesite de una pequeña fuerza y carrera para deslizar un perno que vincule mecánicamente el picaporte con



el cerrojo de la cerradura, de esta manera es posible realizar la apertura simultánea al accionar el picaporte si el mecanismo estaba embragado.

La desventaja de esta idea es la necesidad de varios mecanismos y piezas, y una compleja distribución de los mismos en el limitado espacio que se posee en una cerradura estándar.

Sin embargo, al observar el comportamiento del electroimán construido, es posible idear un mecanismo de fácil adaptación mecánica, con pocas y simples piezas, para realizar directamente los movimientos de apertura y cierre del cerrojo de la cerradura. El diseño en cuestión será discutido en el capítulo de diseño mecánico, aquí simplemente se hace una introducción a la idea general, es decir, como el conocimiento adquirido en la construcción de un prototipo permite realizar una modificación en el diseño, en este caso simplificándolo.

## Capítulo 2: Diseño Eléctrico



## Capítulo 2: Diseño eléctrico de la cerradura

El diseño eléctrico se divide en dos etapas, la primera consiste en el lector RFID (identificación por radio frecuencia), el cual será el encargado de leer el código almacenado en cada tarjeta, y transmitirlo en protocolo serie RS-232 al circuito encargado del control de acceso, el cual además de comunicarse con el lector de tarjetas, también comandará los distintos periféricos (apertura de cerradura, indicaciones luminosas, habilitación tarjeta, etc.).

### 2.1 Generalidades para el diseño de lector

La identificación por radio frecuencia (RFID) consiste en el uso de campos electromagnéticos para la transferencia de datos, con el propósito de identificar automáticamente un objeto cualquiera que esté unido al tag.

En un sistema RFID, son requeridos tres componentes fundamentales:

- **Tag o etiqueta RFID:** es la tarjeta de identificación, consiste básicamente en un chip con una pequeña antena propia; el chip es programado con información que lo identifica unívocamente.
- **Lector:** el elemento que permite establecer la comunicación entre las antenas y comunicar información
- **Antena:** Conectada al lector, para la comunicación con el tag.

El funcionamiento se esquematiza en la Figura 2-1.

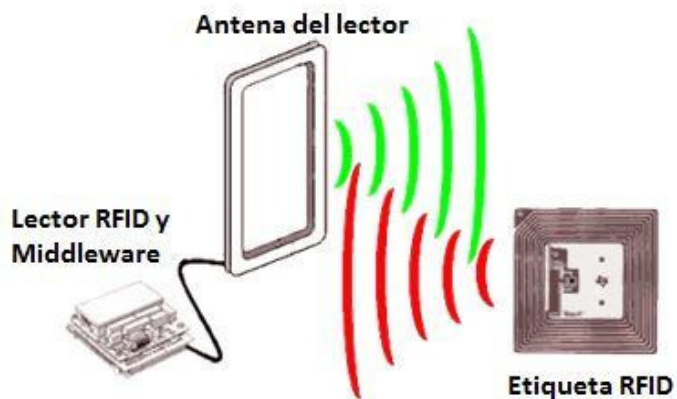


Figura 2-1. Esquema de funcionamiento de sistema RFID.

Existen varias formas de clasificación del sistema RFID, a continuación se enumeran.

- Según el tipo de tag
  - Activo: El tag posee fuente de alimentación, por lo que no es necesario energizarlo a través del campo. Debido a esto posee mucho más alcance que los pasivos.
  - Pasivo: El tag no posee fuente de alimentación, y es activado cuando detecta un campo electromagnético generado por el lector.
  
- Según la frecuencia del campo electromagnético
  - Baja frecuencia: Hasta una frecuencia de 135kHz, el rango de lectura es hasta 5'' como máximo, y se usa en aplicaciones de proximidad.
  - Media frecuencia: Desde 4 a 24MHz, el rango de lectura es medio, hasta 15''.
  - Alta frecuencia: Mayor a 900MHz, el rango de lectura es amplio, mayor a 1m.
  
- Según la posibilidad de intercambio de información
  - Solo lectura: El tag sólo envía un código establecido.
  - Lectura y escritura: Es posible escribir cierta información en el tag.
  
- Según la codificación de los datos
  - Directa: Sin codificación, consiste en detectar la amplitud de modulación; un bajo en el detector de picos es un 0 y un alto es un 1.

- FSK (frequency shift keying): Se usan dos frecuencias distintas para la transferencia de datos acopladas a la fundamental de transmisión; una se corresponde a un 0 y la otra a un 1.
- PSK (phase shift keying): un desplazamiento de fase es interpretado como un pasaje de 0s a 1s.

Un sistema RFID pasivo funciona de la siguiente manera:

1. El tag es activado cuando se encuentra con un campo electromagnético, que es generado por la antena y el lector.
2. El tag envía una respuesta.
3. La antena que generaba el campo detecta la respuesta y la envía al lector.
4. El lector decodifica la respuesta y envía la información a cualquier sistema que la necesita.

Un tag, en un sistema RFID pasivo, es un pequeño transmisor en espera a ser encendido. Tiene un chip que está programado con cierta información, la cual es enviada cuando el mismo es activado.

No contiene por lo tanto su propia fuente de poder, sino que absorbe energía que es propagada por la antena del lector.

## **2.2 Diseño de un lector RFID 125kHz**

### **2.2.1Diseño alto nivel**

A continuación se darán los lineamientos generales para construir un sistema lector de RFID.

Antes de comenzar con el diseño del circuito electrónico, es necesario entender los principios de la tecnología RFID.

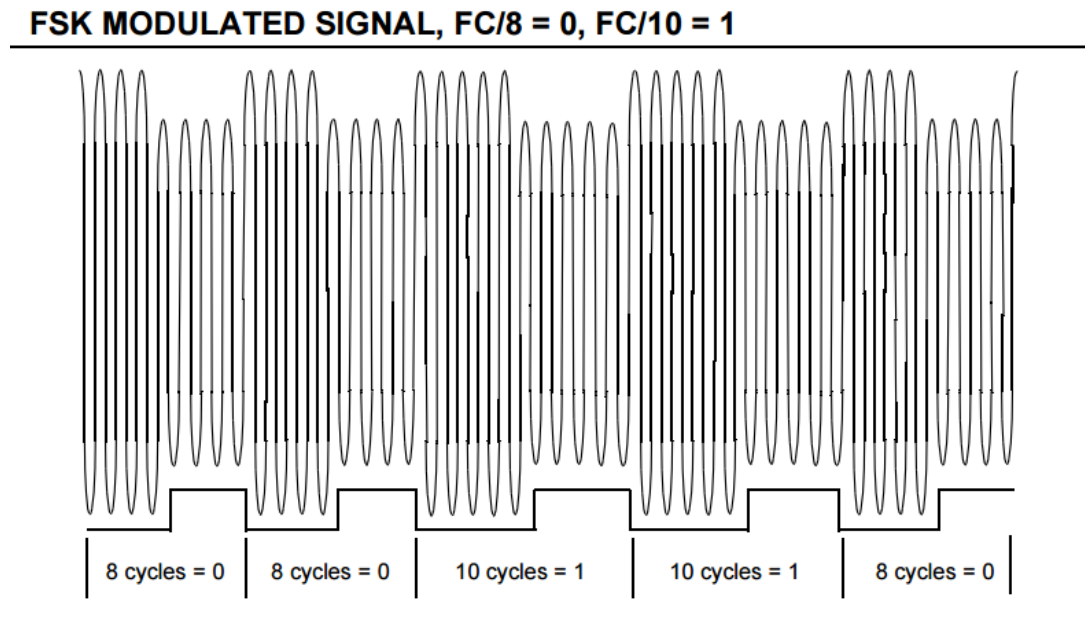
Las tarjetas de RFID pasivas funcionan de manera tal que son energizadas por una señal externa, la cual es a su vez portadora de la señal del circuito lector. Estas tarjetas son bastante simples y están compuestas de una antena L-C y el circuito necesario para modular su señal en la portadora una vez energizada. El lector y la tarjeta se comunican a través de

acoplamiento magnético ya que sus respectivas antenas sensan cambios en el campo magnético, lo que es observado como un cambio del nivel de tensión en el circuito lector.

El tipo de modulación más comúnmente utilizado en las tarjetas es FSK (Frequency Shift Keying, explicado en la clasificación según la codificación de los datos), en este tipo de modulación se utilizan dos frecuencias diferentes para la transferencia de datos, la más común es  $F_c/8$  y  $F_c/10$ , en donde  $F_c$  es la frecuencia portadora. En otras palabras, un `0` es transmitido como ciclos de reloj de amplitud modulada con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de la portadora dividido 8 (en este caso al ser la frecuencia de 125kHz, la frecuencia a la que se transmite el dato será de 15,625 kHz). Y un `1` es transmitido como ciclos de reloj de amplitud modulada con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de la portadora dividido 10 (12,5 kHz).

Además la amplitud de modulación de la portadora cambia cuando hay un cambio de  $F_c/8$  a  $F_c/10$  o viceversa, y el lector cuenta entonces la cantidad de ciclos entre el cambio de pico de la portadora para leer la información. Este sistema permite un diseño del circuito simple, es bastante inmune al ruido, ya que se basa en frecuencia, por lo que no es afectada por pequeños cambios en la amplitud; pero la velocidad de transmisión es lenta comparada a otros tipos de modulación. Esto no es un inconveniente para el presente proyecto, ya que la cantidad de información a transmitir es pequeña, por lo que no hay problemas asociados al tiempo de transmisión.

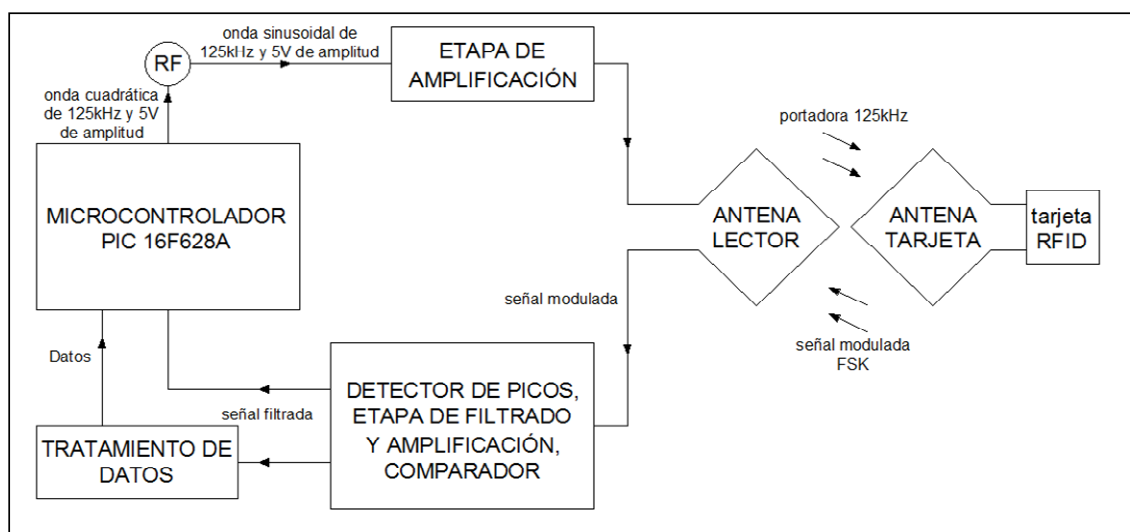
La Figura 2-2 muestra una imagen de modulación FSK, donde se observa el cambio en amplitud a la mitad del respectivo ciclo



**Figura 2-2. Modulación FSK**

El circuito lector consiste en generar la portadora de 125kHz, transmitirla a la tarjeta, detectar el acoplamiento magnético del mismo (que debería ser similar al de la figura anterior). Luego, para interpretar los datos, la frecuencia portadora debe ser filtrada, y las frecuencias en juego (12,5kHz y 15,625kHz) deben ser amplificadas para poder ser medidas.

El diagrama de bloques del circuito se corresponde con el presentado en la Figura 2-3.



**Figura 2-3. Diagrama de bloques para el funcionamiento del lector RFID**

Aunque cada parte individual del circuito y de la programación será descrita en detalle más adelante, la idea general del circuito lector es la siguiente: El microcontrolador provee a través de su PWM (modulación por ancho de pulso) una señal cuadrática de 125kHz, que es la señal de la portadora. Esta se envía a una bobina de choque, que es esencialmente un filtro pasabajos pasivo el cual filtrará las armónicas de alta frecuencia y dejarán una onda senoidal pura de 125kHz. Esta onda es amplificada para maximizar la corriente circulante por la antena, y que de esta manera posea un alcance mayor.

En la parte receptora, la señal es primero rectificada a través de un diodo rápido y luego pasa por un filtro pasivo RC el cual es usado para detectar la portadora y la modulada. Luego pasa por etapas de filtrado y amplificación usando filtros activos, uno pasabanda y otro pasabajos, para decrementar la ganancia en las frecuencias afuera de la banda de 10 a 20 kHz, e incrementar la ganancia de estas hasta llegar a saturar los amplificadores operacionales. En la última etapa de filtrado la señal pasa por un comparador para producir una onda cuadrática ya a niveles lógicos. Por último se utilizan dos flip flops tipo D y un contador de décadas para extraer datos de la señal modulada, los cuales son enviados al microcontrolador en donde se procesarán para interpretarlos.

### **2.2.2 Distintas propuestas para modificar el circuito**

Existen varias maneras de diseñar un sistema lector de tarjetas RFID en términos de vinculación entre hardware y software. En la mayoría de los casos, el software es más barato porque no es necesario "comprar" distintos componentes, pero al mismo tiempo se está consumiendo tiempo de procesamiento del microcontrolador, hasta eventualmente tener que mudar el diseño hacia uno más potente. El mayor uso de hardware incrementará obviamente el costo del producto, pero también aliviará tediosas optimizaciones que serían necesarias implementar para reemplazar un componente.

Por ejemplo una primera propuesta sería utilizar otro integrado para generar la señal portadora de 125kHz, en lugar del microcontrolador (por ejemplo usando el conocido NE555). Sin embargo, debido a que el microcontrolador seleccionado posee salida PWM, esto no será un inconveniente, y no es necesario la utilización de otro componente.

Otra propuesta sería la utilización de DSP (procesador digital de señales) del Pic para analizar la señal de la antena. De esta manera se utilizarían FFT (transformada rápida de



Fourier) para interpretar las frecuencias presentes en la respuesta de la tarjeta y decodificar los datos. El inconveniente sería que al funcionar este a la frecuencia de la portadora, habrían pocos ciclos del microcontrolador para computar la FFT para interpretar los datos, lo que haría que el mismo esté funcionando al límite de su capacidad. Por estos motivos se utiliza una decodificación en hardware la cual será explicada en el ítem 2.3.3 (Etapa de creación de datos).

## 2.3 Elementos específicos del circuito

### 2.3.1 Etapa de transmisión - Bobina de choque y amplificación de señal

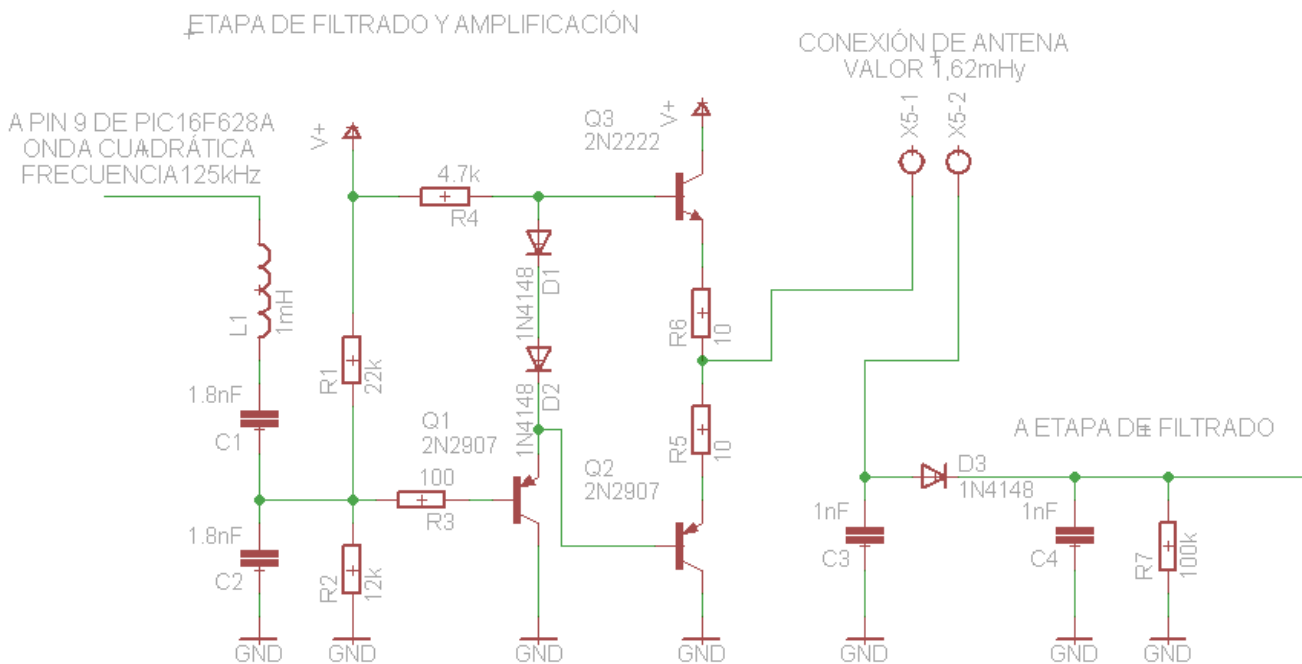


Figura 2-4. Esquema de la etapa de transmisión

El circuito que se muestra en la Figura 2-4 consiste en una bobina de choque seguida de un buffer de corriente y un amplificador de medio puente. La bobina de choque se utiliza para filtrar las armónicas de alta frecuencia de la onda cuadrática, dejando una onda sinusoidal de frecuencia de la fundamental, es decir, 125kHz, la cuál será amplificada en la etapa de transistores siguiente. Los dos diodos que se observan en la configuración de medio puente

son usados para reducir distorsión en el paso por cero de la onda, causada por distintos puntos en los dos transistores en colocarse en los estados de corte y de saturación. Mientras mayor sea la ganancia de los mismos, mayor será la corriente circulante por la antena, y por lo tanto se incrementará el rango de lectura del lector.

La siguiente etapa a analizar es la de la antena, que está compuesta por un circuito R-L-C en serie, por lo que a mínima impedancia (cuando la reactancia capacitiva es igual a la inductiva) circula la máxima corriente.

Para determinar los valores de inductancia y capacitancia adecuados, de forma que el circuito resuene a una frecuencia de trabajo determinada, se utiliza la ecuación 2.1 (que es producto de igualar la reactancia capacitiva con la inductiva):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

En donde

- $f_0$  es la frecuencia de resonancia en Hz
- L es la inductancia de la antena en Henry
- C es la capacitancia del capacitor  $C_3$  de la Figura 2-4 en Faraday

Como se observa, la inductancia de la antena está en función de la frecuencia de resonancia y de la capacidad del capacitor ubicado en serie con la misma.

Seleccionando un capacitor comercial de 1nF (es uno de los más comunes) y conociendo la frecuencia de resonancia que es igual a 125kHz se obtendrá la inductancia de la antena:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 * 125000^2 * 1 * 10^{-9}} = 0,00162Hy = 1,62mHy$$

Por lo tanto la antena deberá tener una inductancia de 1,62mHy.

Para construir una con esa inductancia será utilizado alambre de cobre laqueado de calibre AWG 30 (diámetro 0,2mm), ya que es muy compacto. Se decide por una antena de forma rectangular, debido a que es de la misma forma de los tags a utilizar. Para calcular la misma se utiliza la ecuación 3.2, obtenida de la Guía de Diseño de Sistema RFID de Microchip.

$$L = \frac{0,0276(CN)^2}{1,908C + 9b + 10h} \quad (3.2)$$

En donde

L = inductancia medida en microHenry

N = número de vueltas

C = x + y + 2h

x = ancho del rectángulo en cm

y = altura del rectángulo en cm

b = ancho del paquete de alambre en cm

h = ancho del paquete de alambre en cm

En este caso, proponiendo los siguientes valores

x = 5cm

y = 8cm

h = 1cm

b = 0,5cm

C = 5 + 8 + 2\*1 = 15cm

Despejando el número de vueltas de la ecuación 3.2 resulta:

$$N = \sqrt{\frac{L(1,908C + 9b + 10h)}{0,0276C^2}} = \sqrt{\frac{1620(1,908 * 15 + 9 * 0,5 + 10 * 1)}{0,0276 * 15^2}} = 106,05$$

Por lo tanto con esas dimensiones, la antena deberá poseer aproximadamente 106 vueltas para llegar al valor de inductancia necesitado para la resonancia.

Luego de la antena, la señal pasa a través de un diodo rápido el cual rectifica media onda de la señal para simplificar los datos y luego sigue un filtro pasivo R-C, que filtra la señal de manera de generar picos de tensión, los cuales serán procesados a continuación. Los valores elegidos y que funcionan correctamente son R = 100kOhms y C = 1nF.

### 2.3.2 Etapa de filtrado

Una vez que la señal pasa por el rectificado presentado en el ítem 2.3.1, aparece un capacitor en serie, el cual tiene la función de filtrar la parte continua de la misma, y luego sigue una serie de filtros activos usando el amplificador operacional TL084P, que posee 4 amplificadores operacionales, disminuyendo de esta manera costo y espacio. Esta parte del circuito se esquematiza en la Figura 2-5.

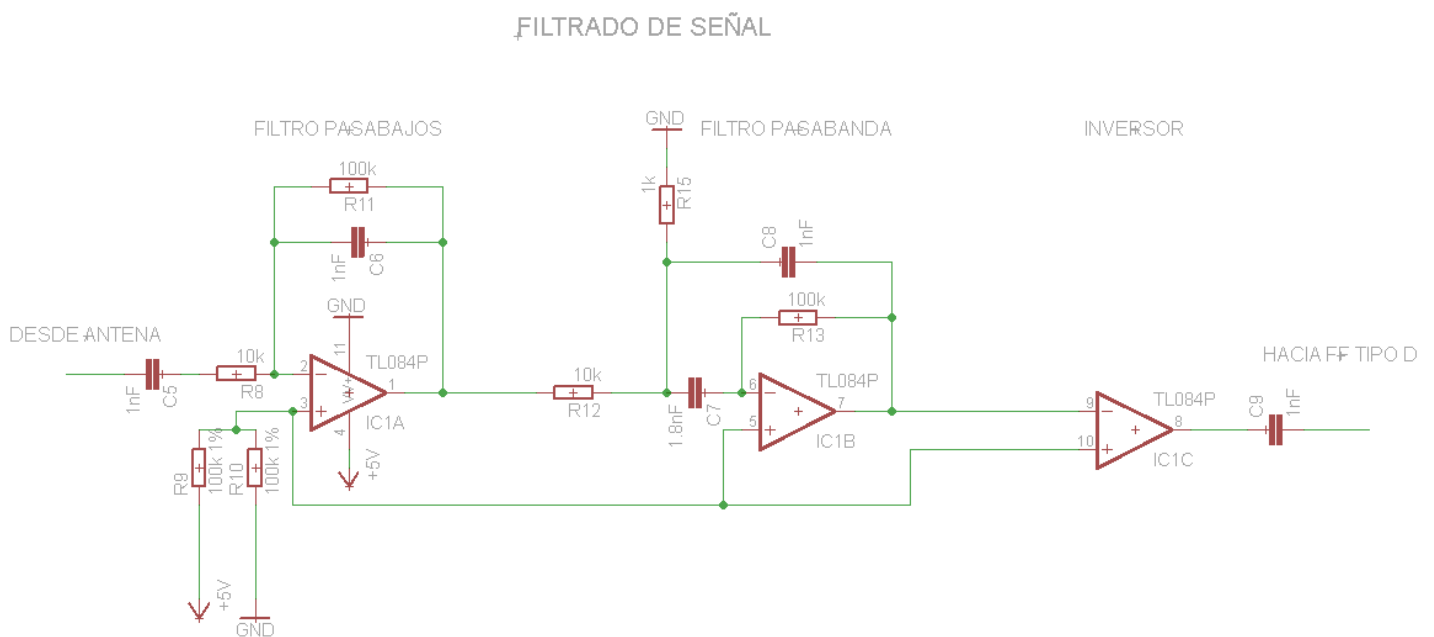


Figura 2-5. Esquema de la etapa de filtrado

La etapa de filtrado capta la onda rectificada y aumenta la magnitud de los componentes de la misma en la banda de frecuencias requerida, mientras que disminuye considerablemente la magnitud de las otras frecuencias. De esta manera se "eliminan" las frecuencias que no interesan.

El primero es un filtro pasabajos de primer orden, el cual se regula a una frecuencia de corte de 30kHz, de manera de filtrar la frecuencia portadora, y el segundo es un filtro

pasabanda de segundo orden, que se utiliza para incrementar la ganancia de las frecuencias pertenecientes al rango de 10 a 20kHz.

De esta manera a la salida del segundo filtro la señal ya es prácticamente pura en las frecuencias de 12,500kHz y 15,625kHz, que son las utilizadas por el tag.

Una vez superada esta etapa, la señal se introduce en otro comparador con la función de generar una onda cuadrática a niveles lógicos, para luego poder procesarla. Cuando ninguna tarjeta está presente, a la salida aparece una onda cuadrática de 28kHz, que representa la mayor frecuencia que pasa a través de la etapa de filtrado con suficiente ganancia para saturar los amplificadores operacionales.

Por último se agrega otro capacitor en serie para nuevamente filtrar la parte continua de la señal.

### **2.3.3 Etapa de creación de datos**

Técnicamente, desde la salida del comparador se debería poder leer e interpretar los datos de la tarjeta utilizando una interrupción. Sin embargo existe un inconveniente:

Para poder medir la frecuencia de los datos enviados por el tag se necesitaría tomar muestras a una frecuencia de 125kHz. El microcontrolador seleccionado trabaja a una frecuencia de  $F/4$ , en donde  $F$  es la frecuencia del reloj exterior utilizado. Suponiendo que se utilice el máximo permitido por el fabricante, que es de 20MHz, entonces la máxima frecuencia de trabajo será de 5MHz.

Esto quiere decir que, con una frecuencia de trabajo de 5MHz, hay 40 ciclos de trabajo del microcontrolador para computar los datos antes que aparezca la siguiente muestra. Lo anterior dicho sería muy difícil de implementar, es decir, para lograrlo se debería conseguir un microcontrolador con una frecuencia de trabajo mucho mayor.

Existe sin embargo una solución a este problema basada en la guía de diseño de Microchip, que utiliza 2 flip-flops tipo D y un contador de décadas. El esquema se observa en la Figura 2-6.

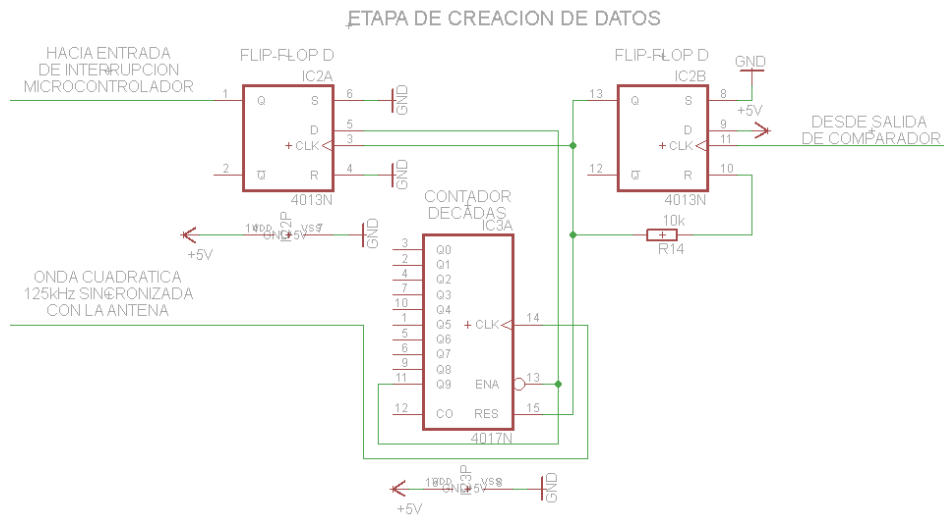


Figura 2-6. Esquema de etapa de creación de datos

El funcionamiento de esta parte del circuito es muy sencillo e interesante.

La salida de comparador funciona como el clock del primer flip-flop, que además tiene 5V (un `1`) aplicado en D. De esta manera, en el flanco positivo del clock, Q es inmediatamente seteado en `1`. A su vez, se observa que Q está conectado al Reset del FF a través de una resistencia, por lo tanto Q no se mantiene en `1` indefinidamente sino que se resetea en un tiempo que depende del valor de la resistencia que se coloque, generando así un pulso sincronizado con el flanco positivo de la salida del comparador. Si no se coloca esa resistencia, el FF se resetea inmediatamente y el circuito funciona erróneamente.

Este pulso sirve de Reset del contador de décadas y de clock para el segundo FF. El contador de décadas es un contador que funciona de la siguiente manera, con cada flanco positivo del reloj el contador coloca el siguiente pin de salidas en `1`. Es decir, en el primer flanco positivo del clock, la salida será 0000000001, en el segundo, 0000000010, y así sucesivamente.

Pero este contador está siendo reseteado con cada flanco ascendente de la salida del comparador, por lo que al haber determinado ya que la frecuencia de  $125\text{kHz}/10 = 12,5\text{kHz}$  es la que representa un 1 lógico, lo único que hay que hacer es chequear el pin de la salida 9 del contador para conocer si está presente esa frecuencia o no. Si el sistema está funcionando a

cualquier otra frecuencia, el contador será reseteado antes de que el pin de la salida 9 esté activo. A su vez la salida de este pin se conecta como entrada del segundo FF y también con el Enable del contador, el cual mantiene la salida en alto aunque el contador sea reseteado justo en ese momento. Debido a esta configuración, la salida Q del segundo FF se mantendrá en `1` el tiempo que se esté modulando la frecuencia de 12,5kHz, y se caerá para cualquier otro valor de la misma.

### 2.3.4 Interpretación de los datos y modulación de código Manchester

Según lo analizado en el ítem 2.3.3, es posible determinar la información que envía la tarjeta mediante el tiempo en que la entrada del microcontrolador esté en `1`. Es decir, la frecuencia de un `1` lógico es de 12,5kHz, por lo tanto el período es  $T = 1/12,5\text{kHz} = 0,00008\text{s} = 0,08\text{ms} = 80\mu\text{s}$ . De la misma manera, la frecuencia de un `0` lógico es de 15,625kHz, entonces el período es  $T = 1/15,625\text{kHz} = 0,000064\text{s} = 64\mu\text{s}$ .

De esta manera, contando el tiempo en que la entrada de interrupción está en alto o en bajo, se puede saber la información que está siendo enviada.

Por ejemplo, suponiendo que el dato a enviar sea 11100111, al detectar el primer `1` la entrada estará en alto, y al ser 3 seguidos, estará en ese estado un tiempo de  $3 * 80\mu\text{s} = 240\mu\text{s}$ . Luego al venir dos `0` seguidos la misma caerá un tiempo equivalente a  $2 * 64\mu\text{s} = 128\mu\text{s}$ , por último siguen nuevamente 3 `1` lógicos, por lo que la entrada estará en alto por un tiempo de 240  $\mu\text{s}$ . Entonces simplemente contando este tiempo es que se obtienen los datos que envía la tarjeta.

Como se ha explicado en el ítem 2.3.1, el tag RFID es capaz de enviar datos modulando el campo electromagnético del lector, la forma más común de modulación, que utilizan la mayoría de las tarjetas es modulación en código Manchester.

En este tipo de codificación el tag produce un nivel de transición en el medio del período del bit, una transición de estado bajo a estado alto representa un `1` lógico, mientras que una transición de estado alto a estado bajo representa un `0` lógico. Esto se muestra en la Figura 2-7

### CODIFICACIÓN MANCHESTER

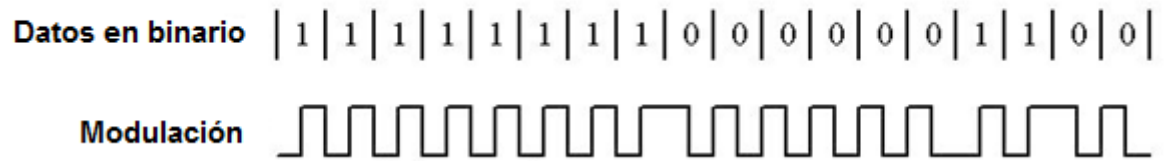


Figura 2-7. Codificación Manchester

Una manera sencilla de decodificar código Manchester es la siguiente:

Se observa que cada dos datos se extrae un bit, si estos dos son `01` el resultado es un `1`, y si son `10` el resultado será un `0`. De esta forma si para decodificar un código Manchester, lo único que se debe hacer es borrar bit de por medio y así obtener la información decodificada.

Por ejemplo el siguiente arreglo de bits sin decodificar `10101010010101`. Para decodificarlo primero se separa de la siguiente manera `10|10|10|10|01|01`, y luego se obtiene el siguiente arreglo: `0000111`.

### 2.3.5 Protocolo EM4100

Lo último que queda para la interpretación de los datos enviados por el tag es conocer el protocolo con el que trabaja, es decir, el significado de cada bit en el arreglo que transmite.

El principal protocolo usado en sistemas RFID de baja frecuencia, y el usado en el proyecto es el EM4100. Este consiste en un arreglo de 64 bits de lectura, en donde el formato y el significado de cada bit es el mostrado en la Tabla III.



**Tabla III. Protocolo EM4100**

	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9 bits de inicio (1)
8 bits con ID fabricante	D00	D01	D02	D03	P0					cada grupo de 4 bits es seguido por un bit de paridad para detectar errores de transmisión
	D04	D05	D06	D07	P1					
32 bits de datos (8 Hex)	D08	D09	D10	D11	P2					
	D12	D13	D14	D15	P3					
	D16	D17	D18	D19	P4					
	D20	D21	D22	D23	P5					
	D24	D25	D26	D27	P6					
	D28	D29	D30	D31	P7					
	D32	D33	D34	D35	P8					
	D36	D37	D38	D39	P9					
paridad columnas	PC0	PC1	PC2	PC3	S0				bit de stop (0)	

En definitiva los datos que envía la tarjeta son los siguientes:

- Los primeros 9 bits son `1`, que son usados para marcar el inicio del arreglo de datos. Esto es debido a que al realizar el control de paridad nunca se puede obtener una secuencia de 9 `1`s seguidos en ninguna localización del arreglo.
- Luego de la secuencia de inicio siguen 10 grupos de 4 bits de datos y 1 bit de control de paridad de esos 4 datos.
- Después 4 bits de control de paridad de cada una de las columnas.
- Por último un bit de stop, que es un `0` lógico.

La tarjeta transmite el arreglo indicado todo el tiempo mientras tenga la energía suficiente para hacerlo.

En la Tabla IV se muestra un ejemplo del arreglo de bits para una tarjeta con el código 70001EF395.

**Tabla IV. Ejemplo de arreglo recibido para el código 70001EF395 con protocolo EM4100**

1	1	1	1	1	1	1	1	1	9 bits de inicio
	7		0	1	1	1	1	1	paridad de las filas
	0		0	0	0	0	0	0	
	0		0	0	0	0	0	0	
	0		0	0	0	0	0	0	
	1		0	0	0	1	1	1	
	E		1	1	1	0	1	1	
	F		1	1	1	1	1	0	
	3		0	0	1	1	1	0	
	9		1	0	0	1	1	0	
	5		0	1	0	1	1	0	
	paridad columnas		1	0	0	0	0	0	bit de stop

## 2.4 Diseño de circuito general

Este será el encargado de proveer la alimentación del sistema, controlar las entradas y salidas, y en definitiva realizar el comando de la cerradura de la manera más eficiente posible.

A continuación se brinda un listado de las entradas y salidas que tiene el circuito y una descripción general del funcionamiento de la cerradura.

Entradas:

- I0 = GRABAR/BORRAR TARJETA
- I1 = BORRAR MEMORIA
- I2 = ABRIR PUERTA
- I3 = SENSOR PUERTA ABIERTA

Salidas:

- O0 = SOLENOIDE APERTURA
- O1 = SOLENOIDE CIERRE
- O2 = SOLENOIDE AUXILIAR
- O3 = LED VERDE (TARJETA OK)

- O4 = LED ROJO (TARJETA NOK)
- O5 = LED AMARILLO ( SISTEMA LISTO)

Según la lista anterior tenemos 4 entradas y 6 salidas, el microcontrolador a utilizar será un PIC 16F628A, cuyo esquema se muestra en la Figura 2-8.

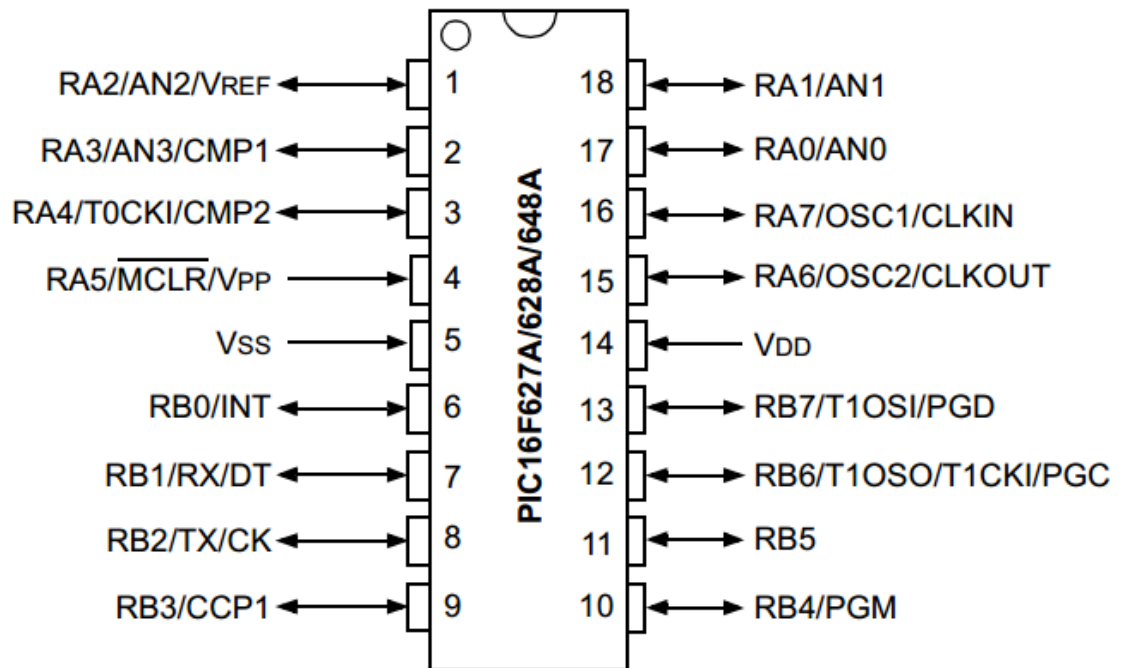


Figura 2-8. Esquema microcontrolador utilizado en el proyecto. Pic 16F628A.

El mismo posee un máximo de 16 entradas / salidas, lo que es suficiente para nuestro propósito, como así también comunicación RS-232, para la recepción de los datos desde el lector de tarjetas.

### 2.4.1 Funcionamiento de la cerradura

El funcionamiento de la cerradura consiste en lo siguiente:

El usuario acerca la tarjeta a la antena del circuito lector, este recibe el código único que posee el tag y lo envía por RS-232 al microcontrolador, el cual verifica si ese código está presente en la memoria. Si es así, abre automáticamente la cerradura si la misma estaba cerrada, o la cierra si estaba abierta, y además indica que la tarjeta fue habilitada mediante el

parpadeo de un led verde. Si el código no está presente en la memoria esto significa que la tarjeta que porta el usuario no está habilitada, por lo que no se realizará ninguna acción de apertura o cierre de la cerradura, solamente el parpadeo de un led rojo, para indicar justamente eso.

Se hace notar que el funcionamiento normal es bastante sencillo, es decir, consiste en la lectura de un código, la verificación de ese código en la memoria y la actuación en función del resultado anterior.

Además existen otras acciones a llevar a cabo, una de ellas es el procedimiento para habilitar o deshabilitar una tarjeta.

Para esto, desde el interior de la vivienda, en la caja del circuito existirá una llave selectora, la cual deberá estar siempre en una misma posición. Cuando el usuario desee agregar o borrar una tarjeta debe girar esta selectora hacia la otra posición y luego acercar la misma a la antena para realizar una lectura. Al enviar el código al microcontrolador y estar la selectora en la posición de grabar / borrar tarjeta se procede a verificar si el mismo está grabado en la memoria o no. Si está grabado se lo borra, deshabilitando la tarjeta, a la vez que parpadea el led rojo pero sin realizar ninguna acción de apertura o cierre de la cerradura. Si el código no se encuentra en la memoria se lo guarda en una posición vacía a la vez que parpadea el led verde, esto indica que la tarjeta está habilitada para funcionar realizando la apertura o cierre automáticos una vez que la selectora se halle en la posición de funcionamiento normal.

Con la manera anterior de habilitar o deshabilitar tarjetas se observa que no es necesario, y hasta podría ser contraproducente el conocimiento del código que posee cada tarjeta. Internamente el microcontrolador verifica el código pero sin enviarlo a ninguna pantalla externa o ninguna computadora (no está contemplado el envío o recepción de datos con una computadora, a excepción del debugging en etapa de pruebas o en un posible mantenimiento). Se hace notar que sería contraproducente conocer el código ya que existen otras tarjetas, que funcionan con otro protocolo, en las cuales es posible escribir el código a ser enviado, y que estas simulen funcionar con el protocolo EM4100 ya descrito en el ítem 2.3.5, es decir, es posible la clonación de tarjetas. Por este motivo se indica que la tarjeta de acceso es similar a una llave mecánica: se debe poseer siempre bajo poder ya que podría ser copiada por personas con el conocimiento para hacerlo, y de esta manera vulnerar la seguridad de la cerradura.

Otra cuestión es la siguiente: ¿qué ocurre si se pierde una tarjeta habilitada para abrir la cerradura? Con el método que se ha descrito, no es posible deshabilitar una tarjeta cuyo código esté grabado en la memoria sin poseer físicamente esa tarjeta, por lo tanto ocurre el símil a una cerradura estándar que consiste en tomar la decisión de si cambiar la cerradura o confiar en que la llave fue perdida en una ocasión accidental y no de sustracción. Sin embargo, aquí la solución que se plantea es diferente y consiste en que mediante la presión de un pulsador que se encuentra en un lugar de difícil acceso, se produce el reseteo de la memoria del microcontrolador, es decir, se deshabilitan todas las tarjetas que se encontraban habilitadas. Por lo tanto a continuación se debe proceder a habilitarlas nuevamente, pero con la seguridad de que no hay ninguna "llave" perdida o sustraída con la que se pueda acceder.

También se agrega una última función que es para una utilización más práctica: consiste en colocar un pulsador en la parte interior de la puerta el cual al presionarlo produce la apertura o cierre de la cerradura, de manera tal de tener un funcionamiento más cómodo, y no necesitar la utilización de la tarjeta RFID cuando se está dentro.

La función del led amarillo está pensado para indicar que el sistema se encuentra OK, y que se apague cuando se encuentre en el modo de habilitar / deshabilitar tarjeta.

Por último existe una circunstancia que debe ser tenida en cuenta: es posible que por algún motivo falle la lectura de la tarjeta y no se pueda ingresar por ningún medio (ya sea que la tarjeta se rompa, que se pierda, etc.), es decir, sin que falle el equipo no se pueda ingresar por no poseer ninguna tarjeta habilitada. El símil a una cerradura estándar sería que se pierda o se rompa la llave y no se posea otra, pero con la diferencia que en la mayoría de los casos un cerrajero hábil podrá de alguna manera abrir la cerradura y fabricar algunas llaves o cambiarla pero sin romper la puerta. En el caso de la cerradura de este proyecto no es posible eso ya que no posee acceso al exterior, y la única manera de abrirla es rompiéndola, lo que debe ser evitado a toda costa (más en este caso en que no ocurrió el inconveniente por una falla mecánica de la cerradura, sino por un motivo que podría ser solucionado de otra manera).

Dos alternativas son propuestas, aunque ninguna será implementada en el presente proyecto por motivos de practicidad. La primera y más sencilla consistiría en dejar grabado en la memoria un código de habilitación que no pueda ser borrado ni tocado por el usuario, y que en caso de esta emergencia sea usado por personal capacitado el cual podrá acceder para solucionar el inconveniente.

La otra solución sería implementar un conector exterior, mediante el cual sea posible comunicarse con el microcontrolador para de alguna manera realizar la apertura de la cerradura (envío de algún código específico por RS-232, utilización de un conector multipolar para realizar una combinación de datos, envío de una señal a una frecuencia determinada, etc.).

## **2.4.2 Funciones para mejorar el proyecto**

Además de lo indicado, existen otras opciones que pueden ser agregadas en un futuro, es decir, el sistema está pensado para poder poseer distintas funcionalidades, algunas de las cuales son indicadas a continuación

### **2.4.2.1 Sobre la alimentación**

Para el funcionamiento del circuito es necesario proveer una tensión continua de entre 18VDC y 28VDC, esta es utilizada para manejar los solenoides y la etapa de potencia de la antena, y regulada a 12V para la alimentación de la lectora RFID y los relés de comando, y nuevamente regulada a 5V para la alimentación del microcontrolador. Además la alimentación debe ser ininterrumpida (soporte de batería o posibilidad de alimentación exterior de emergencia). Primero se realiza un análisis del consumo para determinar el tipo de baterías a emplear.

El consumo del circuito eléctrico consiste en la suma de dos componentes: uno que es estable en el tiempo, y que se corresponde al consumo del circuito cuando se encuentra en estado de stand-by, es decir, en espera de recibir la señal para la activación del solenoide. Este consumo se estima en 5mA. El otro consiste en el consumo instantáneo al momento de energizar el electroimán. Este es despreciable ya que si bien el consumo es alto en el momento de activación del solenoide, al prorratarlo en el tiempo la aportación al consumo es prácticamente cero.

Esto se verifica en la siguiente estimación:

- Consumo medio circuito en stand by = 50mA
- Consumo instantáneo electroimán = 1500mA durante 1 segundo

- Cantidad de veces activación electroimán = 10 veces / día.

Con los datos anteriores, se observa que el solenoide estará activo 10 segundos / día. Un día posee 86400 segundos, por lo tanto al ponderar el consumo instantáneo queda:

$$\frac{10 * 1}{86400} * 1500mA = 0,17mA$$

Por lo tanto el consumo instantáneo será de  $0,17/50,17 = 0,33\%$  del consumo total, por lo tanto es despreciable.

El paso siguiente es seleccionar el tipo de batería acorde al uso que se necesita. A continuación se analiza el comportamiento esperado de cada uno de los principales tipos de baterías:

#### Pilas alcalinas

Esta clase de pilas están formadas por cloruro de sodio o de potasio, poseen una tensión nominal de 1,5V, con una capacidad de alrededor de 2800mAh (las tipo AA). No son recargables.

Utilizando 12 pilas de este tipo en serie se logra una tensión de 18V, suficiente para alimentar al microcontrolador y al solenoide.

Primero se calcula la duración de las mismas

$$\text{Duración} = \frac{2800mA}{50mA} = 56 \text{ h} \cong 2,3 \text{ días}$$

Como se observa, la duración de la batería en este caso es inaceptable, ya que es antieconómico y molesto cambiarlas, haciendo que se deba estar pendiente del estado de carga de las mismas.

Por lo tanto se descarta esta primera opción.

#### Pilas de Níquel Cadmio

Estas son conocidas como pilas recargables, poseen una tensión nominal de 1,2V, con una capacidad ligeramente menor que las anteriores, alrededor de 2000mAh (las tipo AA). El proceso de carga de las mismas es rápido, aunque la principal contra es que deben estar desconectadas del circuito durante este proceso. Por este motivo se deben intercambiar por otras si se desea mantener el equipo en funcionamiento.

Utilizando 15 pilas recargables se lograría una tensión de 18V, con una capacidad de 2000mAh

$$Duración = \frac{2000mA}{50mA} = 40 h \cong 1,6 \text{ días}$$

La duración será de aproximadamente 1,6 días, momento en el cual se deberán intercambiar por otras en buen estado de carga.

Esta opción es similar a la anterior en el hecho que se debe estar pendiente del estado de las baterías, pero, si bien el costo de estas pilas es superior, es más factible económicamente debido a la posibilidad de recargarse de las mismas.

#### Baterías de plomo

Está constituida por dos electrodos de plomo, la tensión nominal entre placas es de 2V, y la capacidad es bastante variable. Son recargables, con un tiempo de carga bastante elevado (en comparación con las anteriores), aunque el proceso de carga es más sencillo y no es necesario que se desconecte del circuito durante el mismo.

Una opción sería la utilización de una batería de gel de 12V y 2200mAh en serie con una de 6V y misma capacidad.

$$Duración = \frac{2200mA}{50mA} = 44 h \cong 1,8 \text{ días}$$

La autonomía usando esta opción es de prácticamente dos días, por lo que es aceptable el uso como soporte de la alimentación general.

#### Baterías de ión de litio

Es una tecnología relativamente nueva al lado de las anteriores, y están en permanente desarrollo. Poseen una tensión nominal de 3,7V entre electrodos, y son recargables.

Son bastante más pequeñas y livianas que las baterías de plomo, aunque su precio es muy superior. También es posible cargarlas mientras el circuito está en funcionamiento aunque el proceso en este caso es mucho más complejo.

Son una excelente opción pero el alto costo de las mismas las hace inviables (para lograr la prestación de una de gel se estima que el costo es de unas 5 veces más), además que con el proceso de carga y descarga constante se vuelven sumamente ineficientes (se estima que al cabo de uno o dos años debe ser reemplazada). Al contrario de las de gel, que pueden seguir en funcionamiento normal luego de varios años.



Luego del análisis previo, la única opción razonables es la utilización de una batería de gel de 12V 2200Ah en serie con una de 6V 2200Ah. Estas baterías plomo son más susceptibles a entregar una alta corriente un tiempo corto, lo que es beneficioso para la activación del solenoide.

De esta manera la solución consiste en realizar una instalación eléctrica de manera tal de alimentar la cerradura con la energía de la red domiciliaria, al tiempo que se carga la batería, y cuando se produzca algún corte de energía es esta última la encargada de alimentar al circuito para poseer alimentación ininterrumpida. El circuito de alimentación en este caso sería similar al de un sistema de alarma.

Existe además la siguiente cuestión: ¿qué sucede si por cualquier motivo el circuito se queda sin alimentación eléctrica? Vale decir, no hay energía de red y se agota la batería.

Para solucionar este problema es posible agregar en la cerradura la opción de una alimentación auxiliar exterior, es decir, si se detecta que la batería se ha quedado sin carga, debe ser posible alimentar momentáneamente el sistema desde el exterior mediante unos conectores especialmente diseñados para esta función. El tema se deja planteado pero no se tendrá en cuenta en el presente proyecto.

#### **2.4.2.2 Sobre el sistema de identificación**

Si bien en el presente proyecto se utiliza la tecnología RFID, este lector puede ser reemplazado por cualquier elemento que dé una identificación unívoca, y unas pequeñas modificaciones en el software. Por ejemplo se puede reemplazar por un lector de huellas digitales, por un teclado alfanumérico en donde se ingrese un código de habilitación, por una pantalla táctil, por un lector de tarjetas magnéticas (no es conveniente ya que funcionan erróneamente luego de un uso elevado). Hasta se podría mediante un módulo de comunicación y una antena controlar la cerradura mediante alguna aplicación en el celular, conociendo el estado de la cerradura (abierta o cerrada) y generar una base de datos en donde figuren las aperturas o cierres y quién las realizó.

Lo comentado anteriormente hace referencia a que existen varias posibilidades de control del sistema, cada uno más adecuado que el otro para ciertas necesidades específicas,

esto debido a la flexibilidad de la electrónica y aplicado a un tema en el que tradicionalmente no se hizo mucho hincapié, que es en el de la seguridad a nivel domiciliario.

### **2.4.2.3 Sobre el método de habilitación de tarjeta**

La forma de habilitar o deshabilitar una tarjeta ya fue descrita en un párrafo anterior. Originalmente consistía en un simple pulsador que debía mantenerse presionado mientras se realiza la lectura, para agregar o borrar el código en la memoria. Pero esto posee el inconveniente que, si bien debe realizarse desde el interior, alguna visita pueda hacerlo en un descuido del usuario, obteniendo así una tarjeta habilitada y sin el conocimiento y/o consentimiento del mismo, ya que no se posee acceso a la memoria del microcontrolador para conocer qué tarjetas se encuentran habilitadas en el sistema.

Por este motivo se cambia el pulsador de habilitación de tarjetas por una llave selectora de tipo industrial, de marca Schmerzel o Telemecanique, con la idea de que el usuario mantenga esta llave siempre en su poder y la utilice cuando sea necesario la programación de la cerradura.

Otra posibilidad que no será implementada en el proyecto es la de ingresar los códigos autorizados por medio de un código alfanumérico que deberá ser ingresado, de esta manera existirían entonces dos sistemas de ingreso simultáneamente, uno por código y uno por tarjeta RFID. Pero la realización ya es más compleja, al ser necesaria la utilización de un teclado.

Por último, se podría realizar una carga de tarjetas autorizadas aprovechando el puerto serie del microcontrolador, y gestionando los códigos de esta manera.

Si bien todas estas opciones son interesantes, se cree que la manera más simple para el usuario final de habilitar o deshabilitar las etiquetas es la utilizada en el proyecto, ya que es sumamente sencilla de realizar y además es rápida, sin necesidad de conocer códigos alfanuméricos o de conectarse con una PC.

### 2.4.3 Diseño propiamente dicho

En la Figura 2-9 se presenta un esquema general de la conexión de los distintos componentes para el funcionamiento requerido.

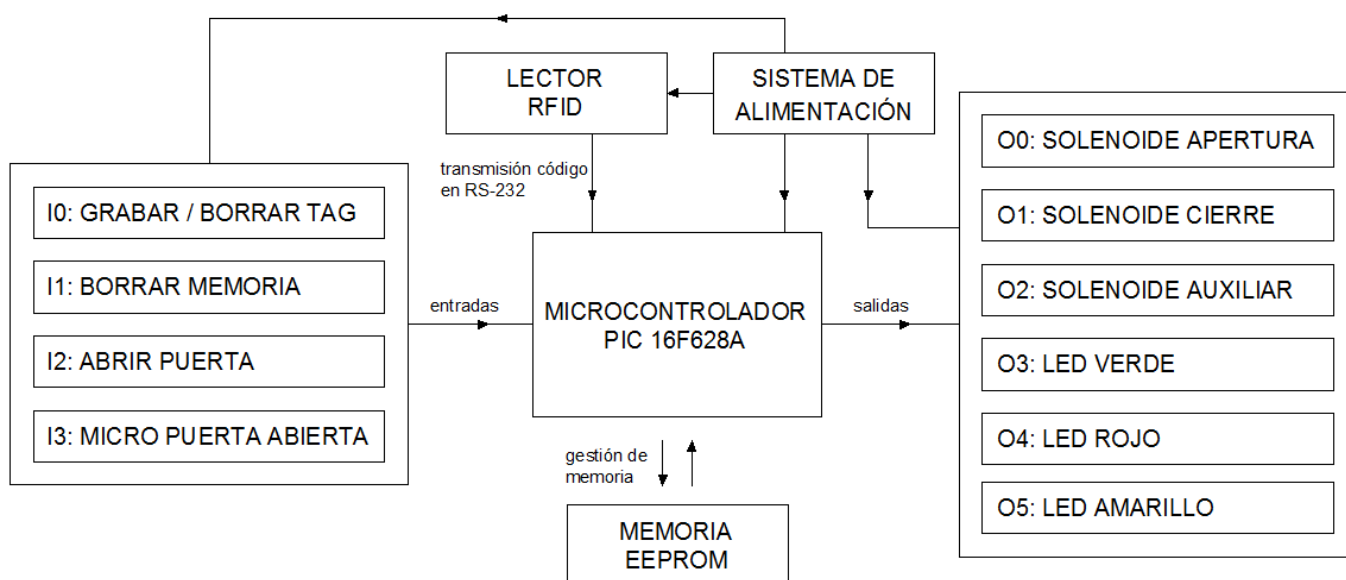


Figura 2-9. Esquema de circuito de control de la cerradura

Ahora se procede a describir cada parte del circuito general en detalle.

#### 2.4.3.1 Comunicación con lector RFID

El primer circuito que se describe será el de transmisión de los datos con el circuito de lector RFID, para ello se utiliza un integrado llamado MAX232 el cual regula tensiones de trabajo según sea un microcontrolador (la transmisión serie se realiza con niveles lógicos de 0 y 5V) o una PC (la transmisión se realiza con niveles de tensión que van entre -15 a 15V).

Es bastante sencillo, se debe conectar la transmisión de datos del lector al receptor de datos del microcontrolador, y la recepción de datos del lector a la transmisión de datos del microcontrolador (esta última no es necesaria, ya que no se envía ningún dato, pero es usada para debugging). La conexión se realiza a través del integrado MAX232, de la manera mostrada en la Figura 2-10. Los capacitores empleados son para variar los niveles de tensión de la forma recién comentada.

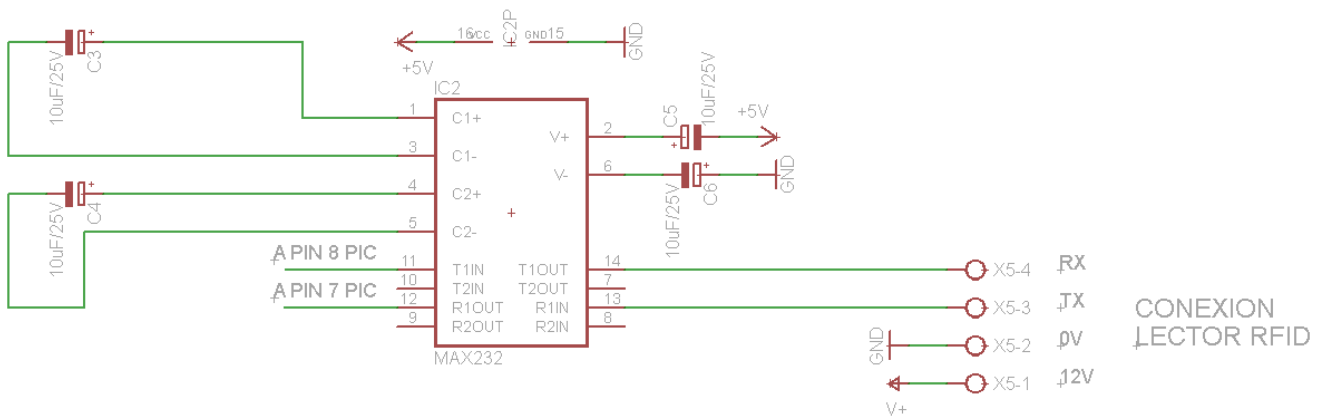


Figura 2-10. Comunicación RS-232 entre microcontrolador de control de acceso y Lector RFID

### 2.4.3.2 Conexión entradas

Para facilitar la programación las entradas se conectan al puerto A del microcontrolador, y en estilo pull-down, para garantizar el estado alto y el estado bajo en los pines de entrada.

En la Figura 2-11 se muestra el diagrama de conexión de las mismas.

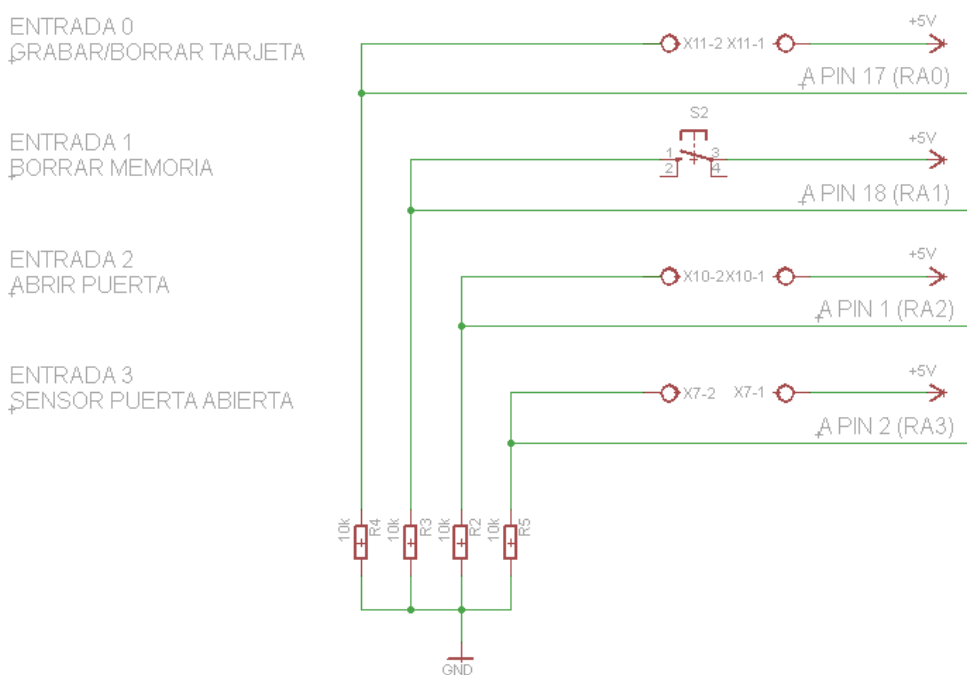
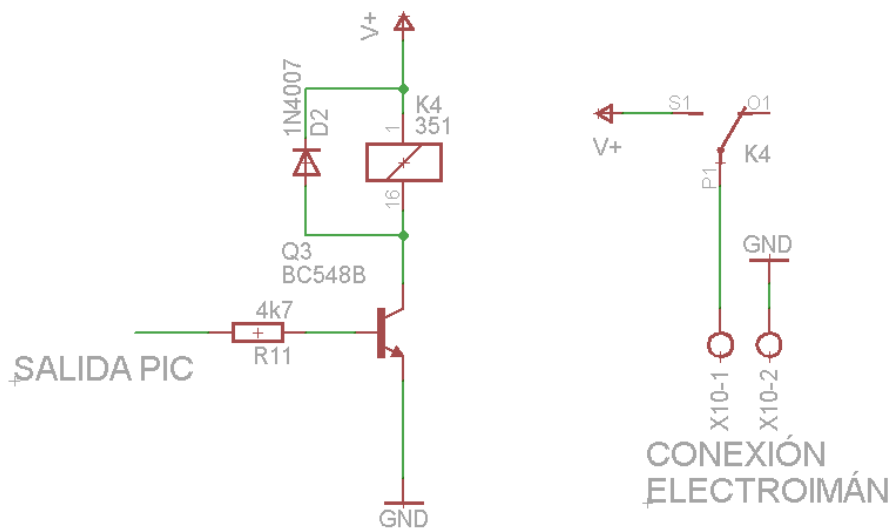


Figura 2-11. Conexión entradas a microcontrolador de control de acceso

Como se observa en la Figura 2-11, todas las entradas están conectadas tipo pull-down, es decir, cuando no están activadas el valor en el pin de entrada es bajo (conectada a tierra a través de la resistencia de 10k). Y cuando están activadas el estado es alto (5V).

### 2.4.3.3 Conexión salidas

Para las salidas de potencia (los tres solenoides) se utiliza el siguiente esquema, mostrado en la Figura 2-12, el cual es bastante sencillo



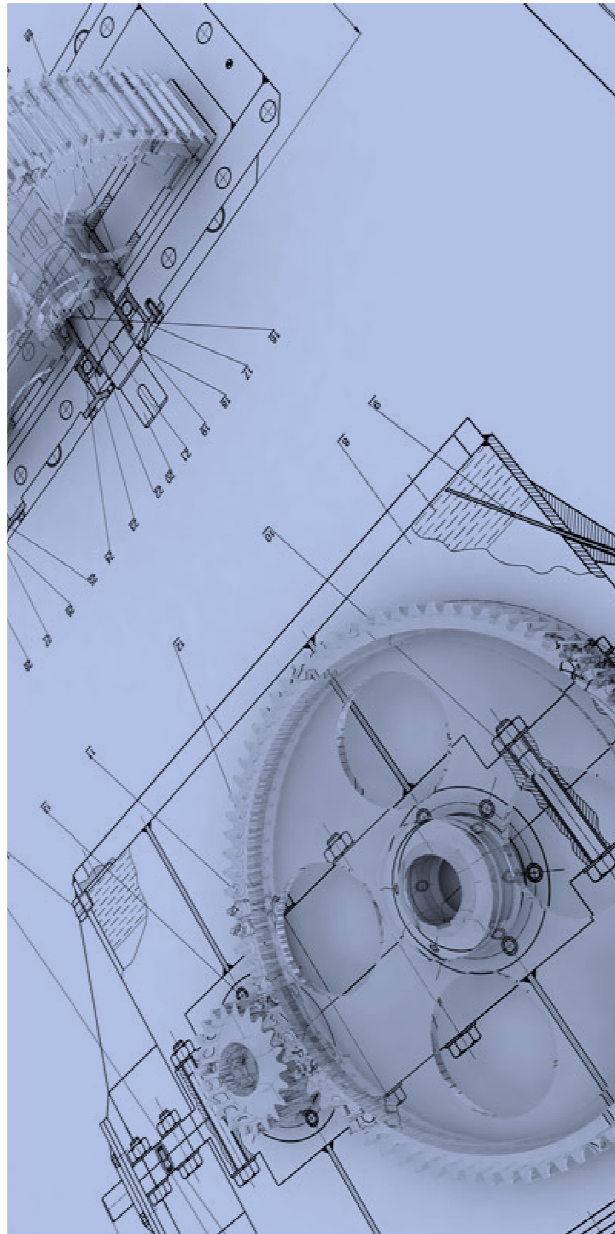
**Figura 2-12. Conexión de salidas de potencia a microcontrolador de control de acceso**

A la salida del microcontrolador se conecta una resistencia que excita la base del transistor NPN. Cuando la salida está en alto, el transistor se satura permitiendo el paso de corriente por la bobina del relé. Cuando la salida está en bajo, el transistor se encuentra en estado de corte por lo que no pasa corriente a través del relé.

El solenoide se conecta en los contactos NO (normal abierto) del relé.

Cuando a través del transistor se desactiva el relé, interrumpiendo la corriente que pasa por la bobina, el campo magnético presente en ella induce en la misma, por un breve momento, una tensión elevada de polaridad opuesta en sus terminales. Este pico de tensión, conocido como tensión de apertura, puede dañar el transistor de control, dañando a su vez la salida del microcontrolador. Por estos motivos se conecta un diodo en paralelo a la bobina del relé.

## Capítulo 3: Diseño mecánico de la cerradura



## Capítulo 3: Diseño mecánico de la cerradura

### 3.1 Descripción cerradura modelo estándar

Para el diseño de la cerradura del presente proyecto se parte de utilizar una cerradura estándar, marca Acytra modelo 101. En la Figura 3-1 se muestra un plano con las dimensiones generales de la misma.

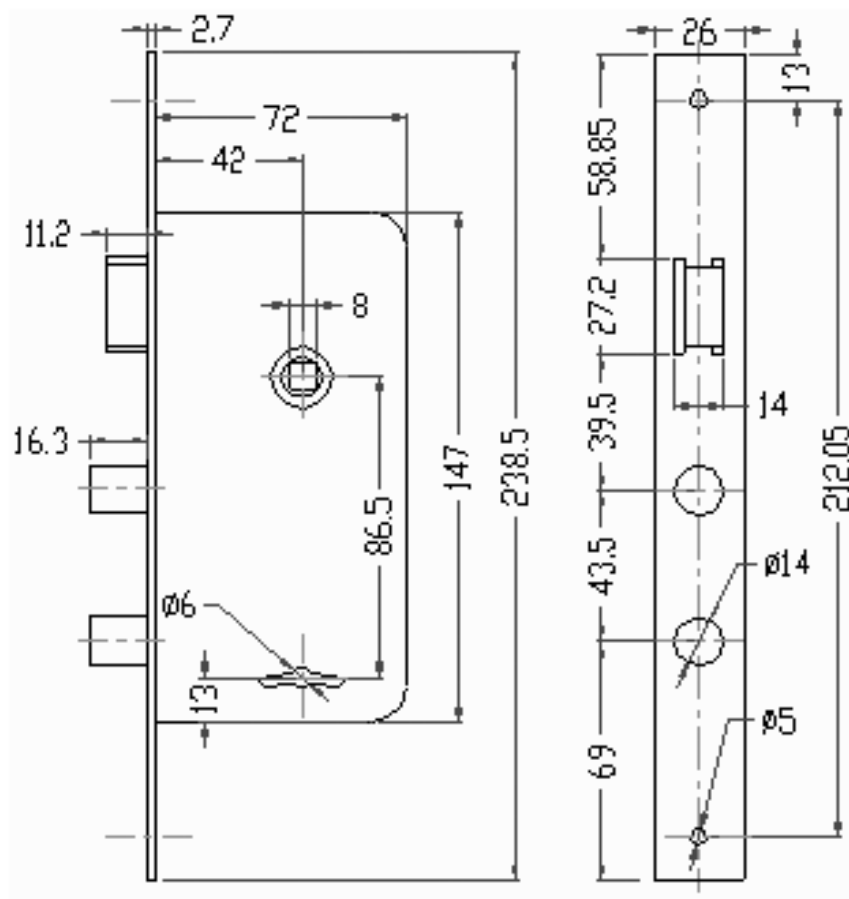


Figura 3-1. Dimensiones generales de la cerradura Acytra 101

Posee un espesor de caja de 17mm (no está esquematizado), y al ser la chapa de la caja de poco más de un milímetro de espesor, el espacio libre en el interior es ligeramente mayor a 14mm. Esto debe ser tenido en cuenta ya que todos los elementos deben estar contenidos dentro de la cerradura, de otra manera sería complicada su instalación ya que deberían realizarse modificaciones en la puerta o en el marco.

En la Figura 3-2 se observa un despiece de esta cerradura, el objetivo es conocer todos los elementos que la componen, explicar cada uno y tratar de aprovechar la máxima cantidad posible para el nuevo diseño automatizado.

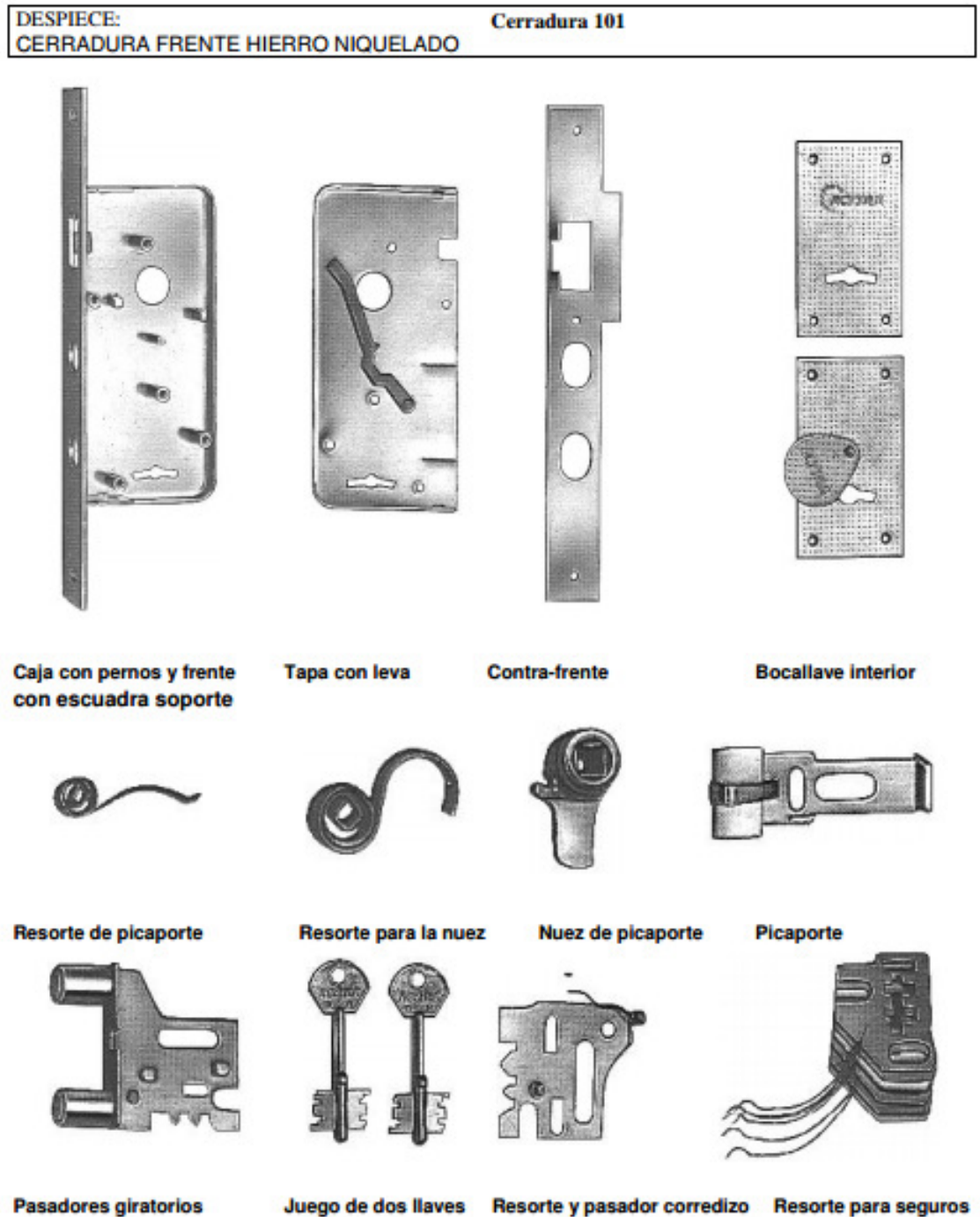


Figura 3-2. Despiece cerradura Acytra modelo 101

Como se observa en la Figura 3-2, los componentes que forman una cerradura Acytra modelo 101 son:



-Carcasa con pernos y frente: Es el elemento que contiene a todos los demás, será utilizado ya que el diseño se basa en esta carcasa.

-Tapa de carcasa con leva: La otra mitad de la carcasa, se utiliza pero sin la leva ya que la misma no tendrá uso en el nuevo diseño.

-Contrafrente: va ubicado en el marco de la puerta, en este caso no se utilizará para la fabricación del prototipo ya que no es necesario para el funcionamiento.

-Resorte de picaporte: utilizado para mantener el picaporte en la posición de reposo.

-Resorte para la nuez: utilizado para mantener la manija del picaporte en la posición de reposo.

-Nuez de picaporte: Es una pieza de bronce, mediante la cual se vincula el movimiento de la manija del picaporte con el picaporte.

-Picaporte: es el elemento utilizado para abrir o cerrar una puerta, una vez que la cerradura se encuentra en posición sin cerrojo.

-Pasadores giratorios: son los elementos que efectivamente impiden la apertura de la puerta. Será utilizado pero realizando una modificación en el elemento portante de los mismos.

-Llaves, pasador corredizo y chapas de combinaciones: son los elementos encargados de realizar el movimiento de los pasadores, para producir el cierre o apertura de la cerradura. No serán utilizados, en cambio se utilizará un sistema electromecánico basado en solenoides, el cual será diseñado en este capítulo en el ítem 3-2.

### **3.2 Diseño de la cerradura con accionamiento electromecánico**

Según lo expresado en el ítem 3.1, se utilizan prácticamente todos los componentes de la cerradura original, menos los encargados de la apertura mecánica. En la Figura 3-3 se muestra un esquema de la cerradura quitando esas partes, realizado con Autocad 2015.

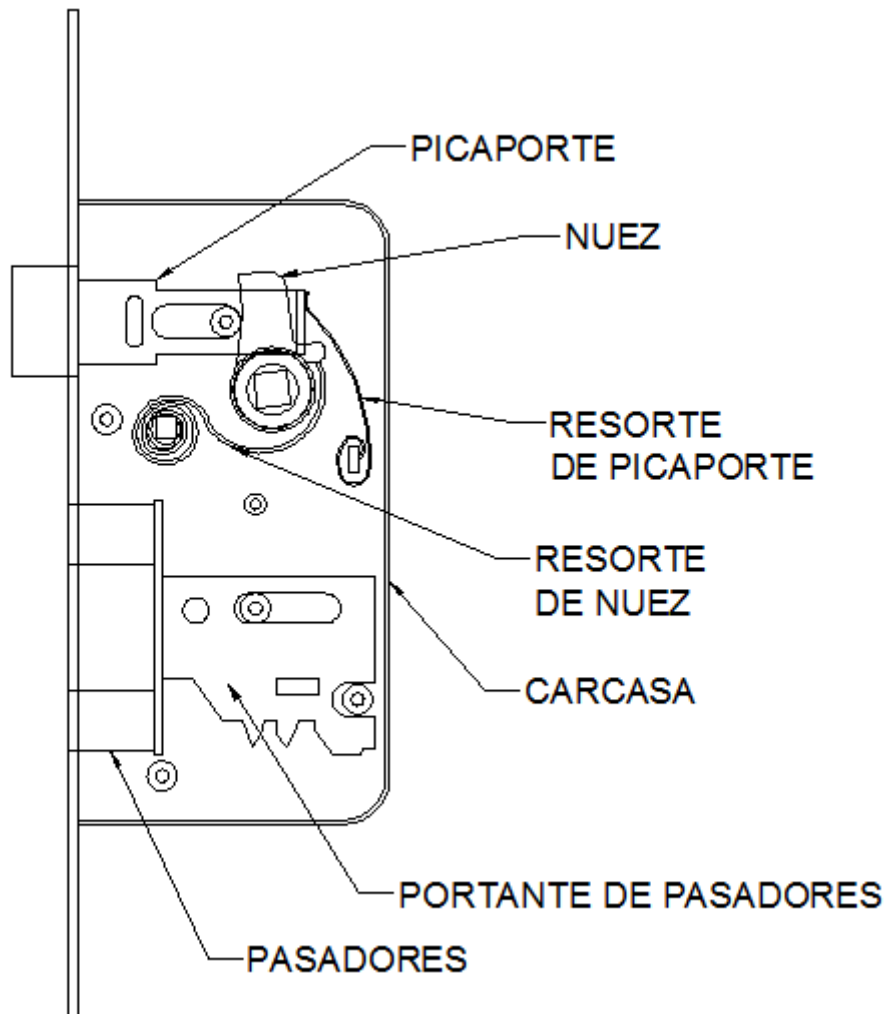


Figura 3-3. Esquema de la cerradura Acytra 101, luego de quitar las piezas que no serán usadas.

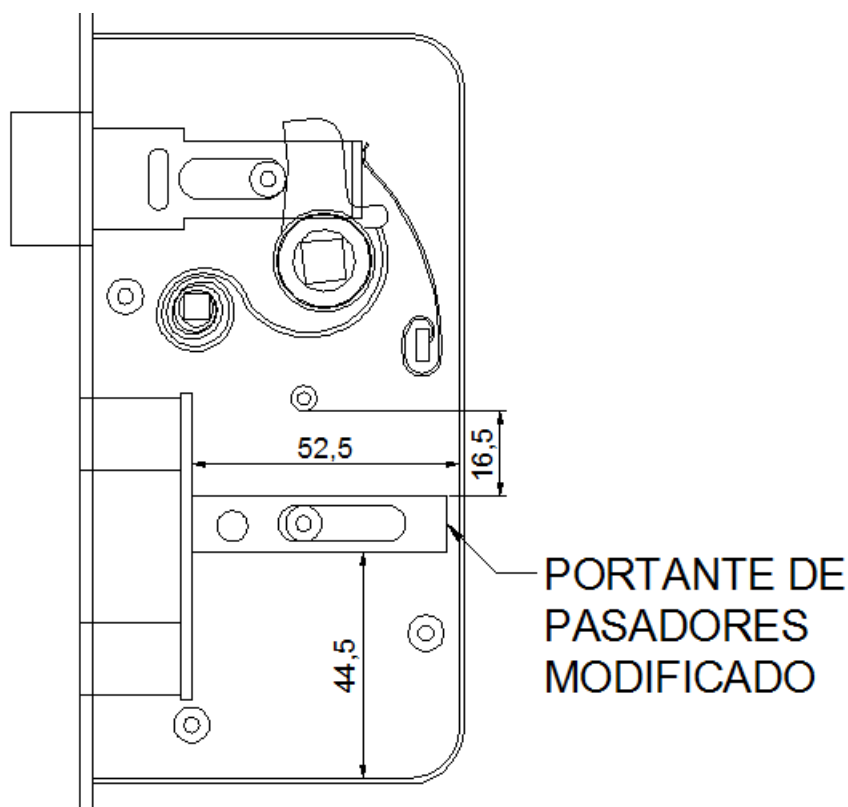
La idea original para el diseño era la utilización de un pequeño solenoide, ubicado en la parte superior (el espacio vacío encima de la nuez), el cual mediante un mecanismo de pasador, embrague una pieza a fabricar con la nuez. Esta pieza una vez embragada sería la encargada de transmitir el movimiento exterior (desde la manija del picaporte) hacia el portante de pasadores, mediante algún mecanismo auxiliar a diseñar.

Esta idea fue desechada por los siguientes motivos:

1. Demasiados mecanismos auxiliares a diseñar y construir, además de un funcionamiento complejo, con una alta posibilidad de fallas (problemas de embrague del pasador si la nuez no está en la posición correcta, modificación de la nuez para realizar movimiento en los dos sentidos, interferencia de nuevos mecanismos con resortes auxiliares ya existentes, poco espacio para el electroimán y el mecanismo de pasador)

2. Modo de funcionamiento para el usuario relativamente complejo, vale decir, al realizarse la apertura de la puerta, en realidad la misma no queda abierta, sino que el pasador queda vinculado al picaporte por un cierto tiempo (en este tiempo se debe realizar la efectiva apertura de la cerradura, mediante el accionamiento del picaporte). De esta manera, no es posible una apertura remota, sino que siempre debe haber alguien que realice el accionamiento en el momento que el sistema se encuentre embragado.
3. Posibilidad de realizar un diseño más simple debido al conocimiento adquirido en el diseño de electroimanes (descrito en el Capítulo 1), de manera de vincularlos de manera directa al movimiento de los pasadores.

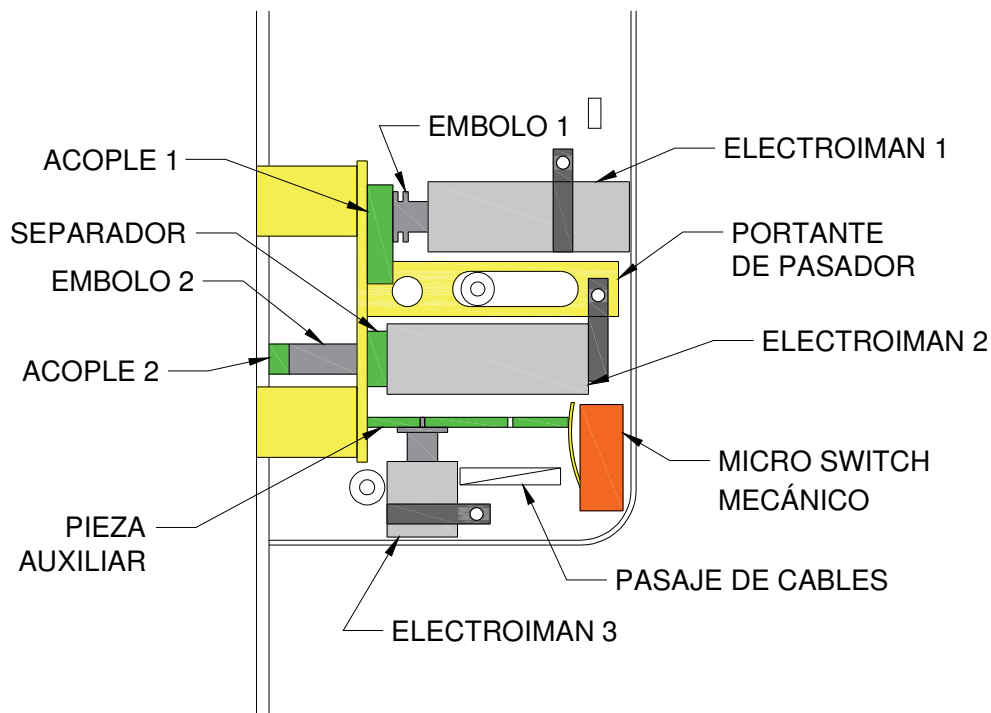
De esta manera, realizando un corte en la chapa portante de los pasadores, queda disponible un espacio considerable para el montaje del nuevo mecanismo, se observa en la Figura 3-4.



**Figura 3-4. Espacio disponible para electroimanes luego de realizada una pequeña modificación**

En el espacio disponible se colocan los dos electroimanes principales, uno encargado del movimiento de apertura y otro del movimiento de cierre, y además uno auxiliar para trabar los pasadores una vez estén en la posición de abiertos o cerrados. También se agrega un micro

mecánico, para determinar cuando la cerradura se encuentra abierta. En la Figura 3-5 se esquematiza lo dicho y luego se explica el funcionamiento.



**Figura 3-5. Cerradura con los 3 electroimanes para el funcionamiento automatizado**

El funcionamiento es el siguiente:

Cuando la posición del émbolo del electroimán es la máxima posible (en el límite de la carrera), la fuerza de atracción es muy baja, esto es debido a que el mismo no distorsiona el campo magnético lo suficiente. Por este motivo es muy difícil utilizar un resorte para realizar el movimiento de expulsión del vástago. Es decir, si el resorte que realiza el movimiento de expulsión del émbolo del solenoide a su posición de reposo posee una  $k$  baja (es blando), el solenoide logra vencerlo en el movimiento de atracción. El problema surge cuando se desactiva el mismo, ya que el resorte es tan blando que no logra llevar el émbolo junto al mecanismo de pasador a la posición de reposo. De la misma manera, al usar un resorte con una  $k$  lo suficientemente elevada para lograr expulsar el émbolo hacia la posición de reposo, entonces el electroimán no posee la suficiente fuerza en esa posición para lograr iniciar el movimiento de atracción. Así, el movimiento resulta muy errático y no es aceptable.

La solución para por utilizar dos electroimanes, correctamente acoplados, de manera que uno sea el encargado de realizar el movimiento de apertura de los pernos, y otro el

movimiento de cierre, sin la utilización de ningún resorte, y disminuyendo al mínimo posible el rozamiento del sistema de pasadores.

En la Figura 3-5 se observa que la carcasa del electroimán 1 está sujeta a la carcasa de la cerradura mediante una brida, y el émbolo del mismo está acoplado a la chapa portante de los pasadores mediante un plástico separador, por lo tanto este electroimán será el encargado de realizar el movimiento de apertura de la cerradura, es decir, de hacer entrar los pasadores a la cerradura. La utilización del plástico separador es muy importante, ya que en caso de no usarlo (y realizar el acople directamente del émbolo, o a través de una chapa), el campo magnético se cierra a través de la carcasa de la cerradura misma, impidiendo así que se distorsione lo suficiente para lograr la fuerza necesaria para realizar el movimiento. En definitiva, el electroimán no funcionará de manera correcta. Por este motivo el elemento de acople debe ser un material no magnético tal como plástico, bronce, aluminio. En este caso se usa plástico por ser fácil de mecanizar y por disponibilidad, y el acople se realiza con tornillos M3 de acero inoxidable no magnético.

El caso del electroimán 2 es inverso, su émbolo se halla vinculado a la carcasa de la cerradura, a través de un plástico separador (igual que en el caso del electroimán 1), y la carcasa del solenoide se fija a la chapa portante de los pasadores, de esta manera, al activarse este electroimán, la carcasa se moverá hacia el émbolo fijo, llevando consigo los pasadores, por lo tanto este electroimán será el encargado de realizar el movimiento de cierre de la cerradura, llevando los pasadores hacia el exterior de la misma.

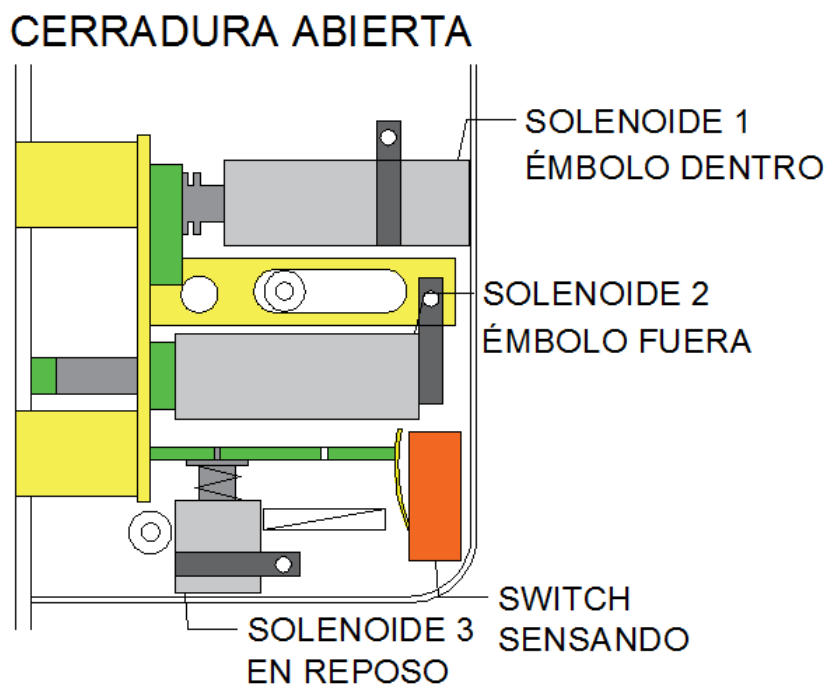
Por lo visto anteriormente, se ha logrado el movimiento de los pasadores en las direcciones de cierre y de apertura, pero existe un inconveniente: el movimiento de los pasadores es libre, no posee una posición fija, por lo tanto los mismos se pueden mover aplicando una fuerza exterior sobre ellos. De esta manera pueden ocurrir movimientos indeseables.

Debido a esto se agrega el electroimán número 3, que es más pequeño que los otros, junto a una pieza auxiliar de material plástico. Este será el encargado de enclavar los pasadores en dos posiciones fijas y definidas, la posición de apertura y de cierre, de manera de tener una localización segura. Este electroimán poseerá un resorte en el émbolo, para lograr una posición de reposo con el mismo en posición extendida, enclavando el pasador en alguna de las dos posiciones. De esta manera, para permitir el movimiento de los pasadores, primero se debe actuar sobre este electroimán, y luego sobre el de apertura o cierre según la acción que sea requerida.

Además la pieza auxiliar que está solidaria al pasador, en su extremo es utilizada también para accionar sobre un microswitch mecánico, de manera de poder sensar cuando la cerradura esté abierta. Esto puede ser utilizado para enviar información del estado de la misma (no implementado en este proyecto), y además en el programa de control del movimiento.

### 3.2.1 Modo de funcionamiento: Cierre

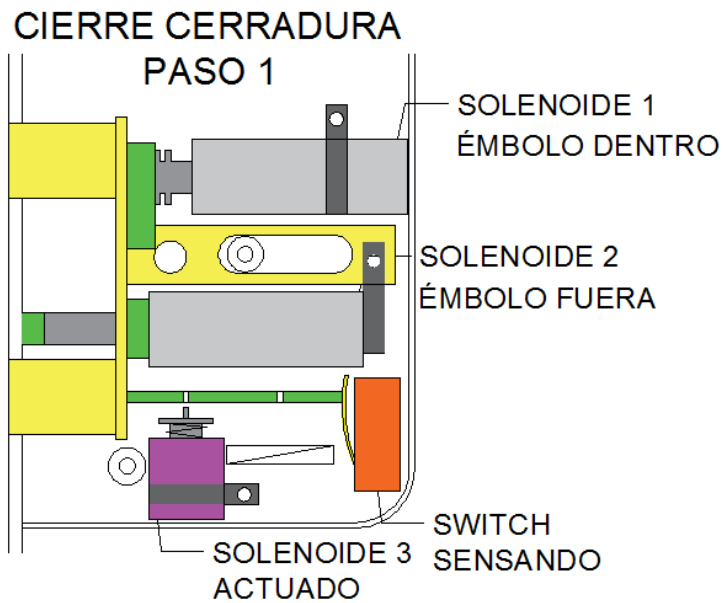
A continuación se explica el proceso del cierre de la cerradura. Para ello se parte de la posición de reposo, con la cerradura abierta



**Figura 3-6. Cerradura abierta**

Como se observa en la Figura 3-6, ningún solenoide está activado, el switch se encuentra sensando la posición, y los pernos se encuentran dentro de la carcasa. Este estado es llamado de cerradura abierta.

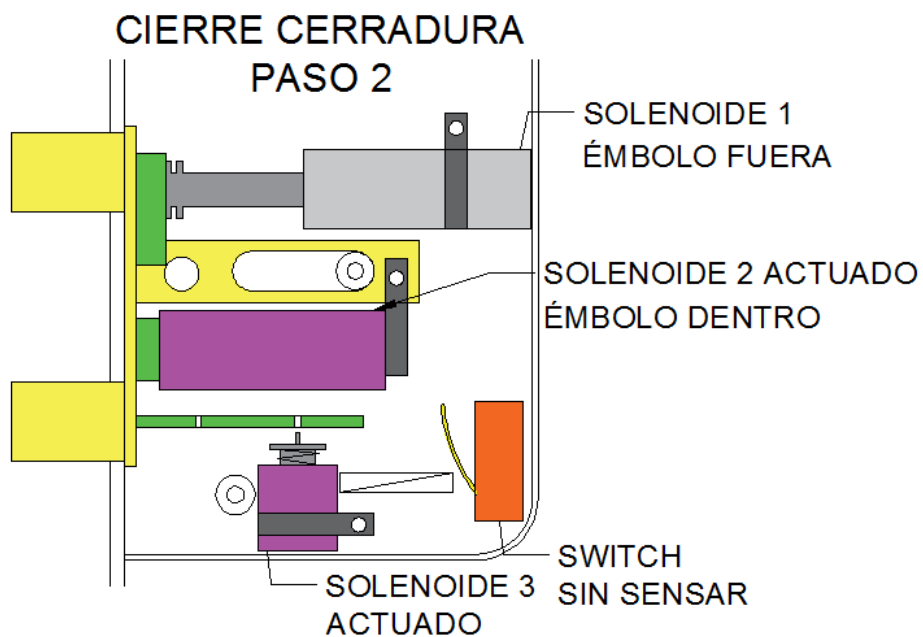
El primer paso es activar el solenoide 3, de manera de liberar la traba y permitir el movimiento de los pasadores, como se esquematiza en la Figura 3-7.



**Figura 3-7. Cierre de la cerradura, paso 1. Activación solenoide 3**

Al circular una corriente por el solenoide 3, el émbolo se mueve hacia dentro venciendo al resorte y permitiendo así el libre movimiento.

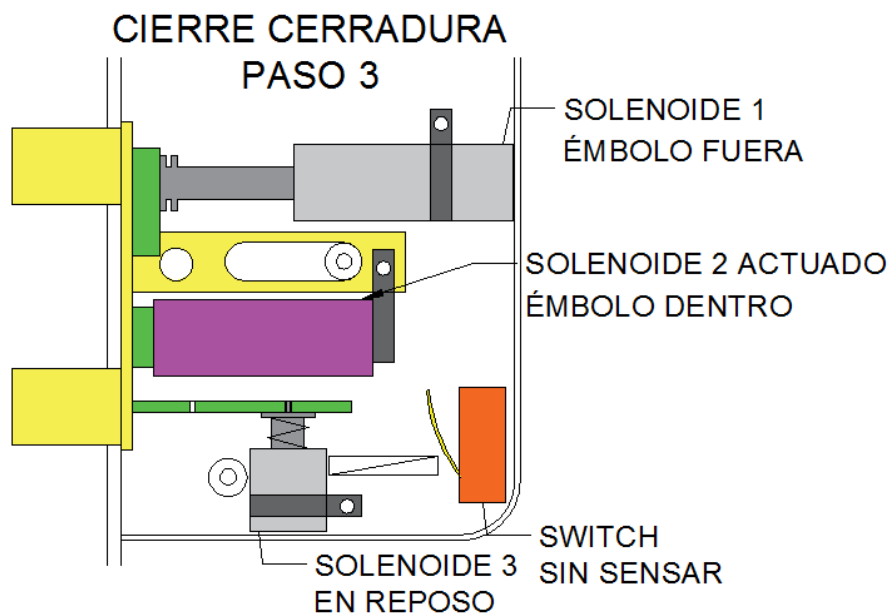
El siguiente paso es activar el solenoide 2, que es el de cierre, de manera de expulsar los pernos hacia fuera de la cerradura.



**Figura 3-8. Cierre de la cerradura, paso 2. Activación solenoide 2.**

Al circular una corriente por el solenoide 2, el émbolo tiende a entrar a la carcasa, pero al estar fijo a la cerradura, es la carcasa del electroimán lo que se mueve, de forma que todo el conjunto móvil se desliza hacia afuera de la carcasa de la cerradura, hacia la posición de cierre. Además al iniciar el movimiento, el switch deja de sentir, por lo que se interpreta que la cerradura no se encuentra más abierta.

Luego al estar los pernos en la posición exterior, se desactiva el solenoide 3, de manera de trabar el movimiento de los mismos.



**Figura 3-9. Cierre de la cerradura, paso 3. Desactivación solenoide 3.**

Es importante que se traben los pernos antes de que se desactive el solenoide 2, ya que de lo contrario puede existir un leve desplazamiento que haga que los mismos no queden en posición correcta. Por esto primero se desactiva el solenoide de traba, y en el siguiente paso el de cierre.

Finalmente se desactiva el solenoide 2 y la cerradura queda completamente cerrada.



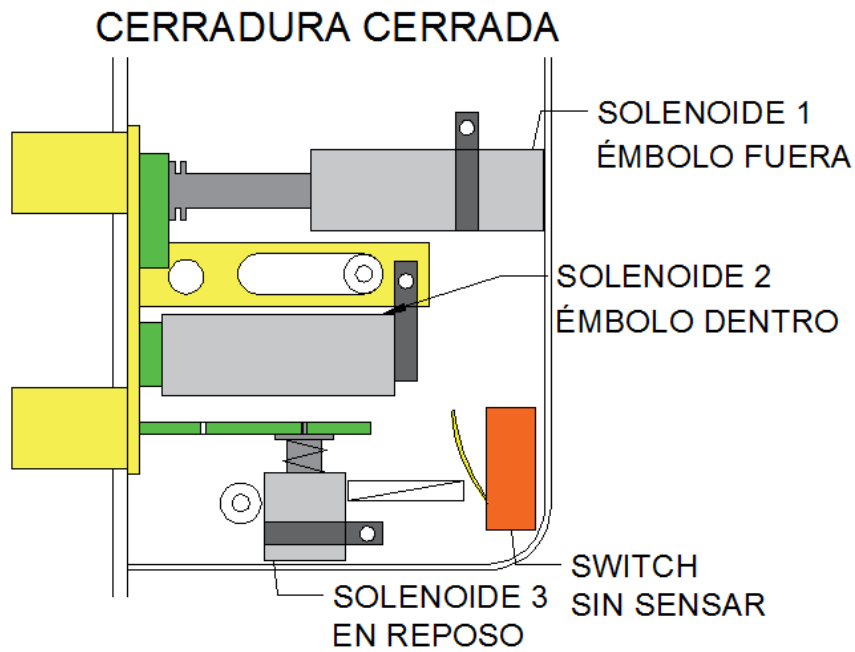


Figura 3-10. Cierre de cerradura, paso 4. Desactivación solenoide 2.

### 3.2.2 Modo de funcionamiento: Apertura

Para lograr la apertura de la cerradura el mecanismo es similar al de cierre, explicado en el ítem 3.2.1, solamente que el solenoide utilizado es el 1 en lugar del 2.

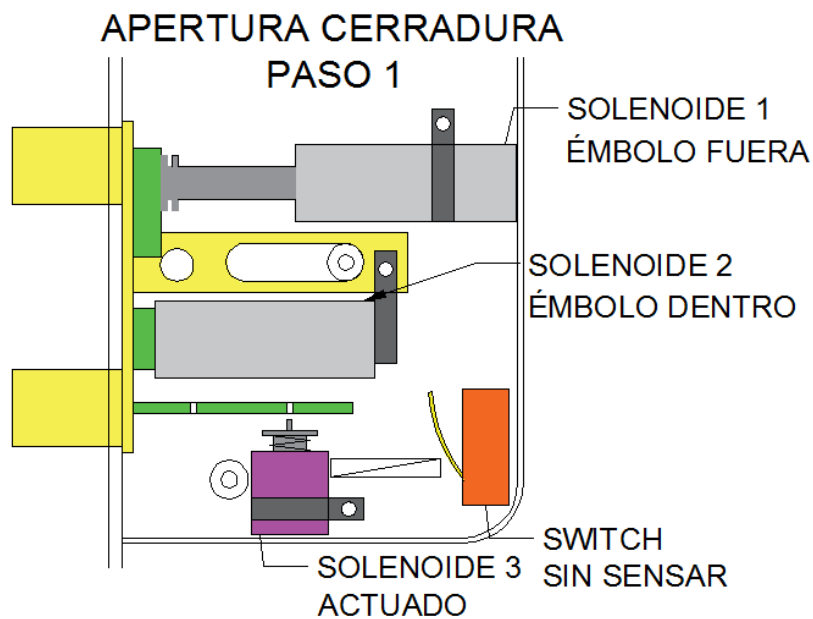


Figura 3-11. Apertura de la cerradura, paso 1. Activación solenoide 3.

Partiendo de la cerradura cerrada el primer paso es activar el solenoide 3 para destrabar el mecanismo.

Luego se activa el solenoide 1, el de apertura, con lo que el émbolo que es móvil se introduce en la carcasa del electroimán, llevando los pernos hacia dentro de la cerradura, en la posición de apertura. Además el switch comienza a sensar.

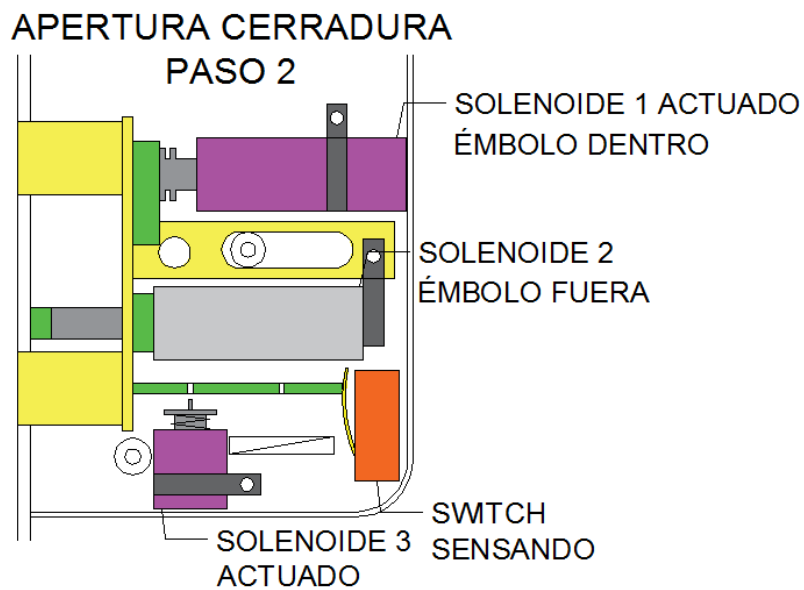
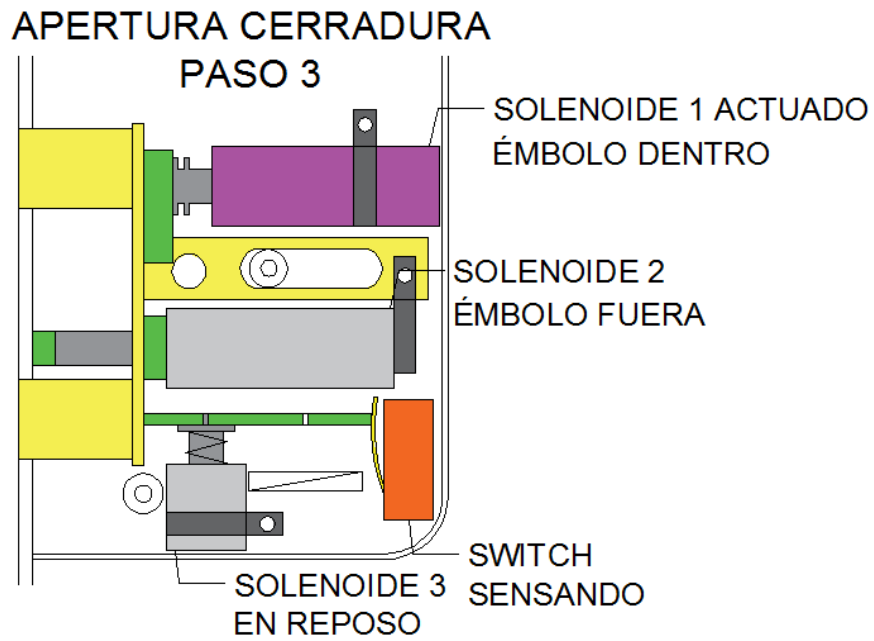


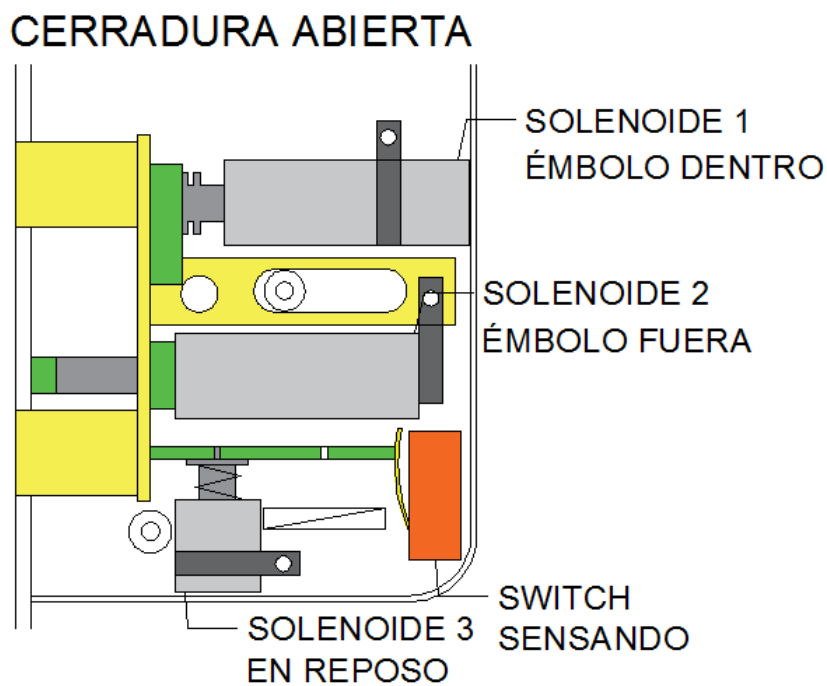
Figura 3-12. Apertura de la cerradura, paso 2. Activación solenoide 1.

El paso siguiente es trabar el mecanismo móvil en esa posición, cortando la circulación de corriente por el solenoide 3.



**Figura 3-13. Apertura de la cerradura, paso 3. Desactivación solenoide 3**

Y por último se corta la circulación de corriente por el solenoide 1, finalizando el proceso de apertura de la cerradura, quedando la misma abierta.



**Figura 3-14. Apertura de la cerradura, paso 4. Desactivación de solenoide 1**

### 3.2.3 Consideraciones generales

A continuación se dan algunas observaciones a tener en cuenta para el funcionamiento del mecanismo descripto:

-El funcionamiento individual de cada uno de los solenoides debe ser con el mínimo rozamiento posible, esto se logra utilizando un buje de bronce, como se verá en el diseño de los mismos.

-Además el émbolo debe tener juego en dirección radial, de manera de permitir un movimiento fluido, no es importante la precisión en esa dirección.

-Una vez armado el conjunto de dos solenoides también debe tener juego lateral, de modo contrario se trabaría al ocurrir la mínima desalineación, aparte de que el ajuste debería ser perfecto, cosa complicada debida a la naturaleza misma de los electroimanes, y al ambiente en donde trabajarán. Esto se logra vinculando a los electroimanes con los otros elementos mediante bridas que permitan un leve movimiento tanto axial como radial.

-La pieza de chapa que es portante de los pernos corre sobre dos patines de bronce que se acoplan a la carcasa de la cerradura, para mejorar el posicionamiento y movimiento de la misma.

-Las piezas de plástico son fundamentales ya que al no ser magnéticas impiden el cierre del circuito magnético por caminos que harían imposible el funcionamiento de los solenoides.

-Para acoplar estas piezas de plástico a los émbolos de los solenoides se utilizan tornillos de material no magnético, en este caso de acero inoxidable (se debe verificar que sea no magnético, ya que hay aceros inoxidables que sí lo son).

-El separador que se utiliza en el solenoide 2 es para puesta a punto, puede ser de cualquier material, pero es más sencillo realizarlo de plástico.

-La pieza de plástico en donde actúa el solenoide 3 es factible de ser la misma pieza separadora, pero la construcción sería complicada para un prototipo. Para el presente trabajo, la misma se pega con pegamento a la carcasa del solenoide 2.

-El resorte del solenoide 3 debe ser puesto a punto de manera que pueda expulsar al émbolo hacia afuera pero pueda ser vencido por la actuación del electroimán.

### 3.2.4 Componentes necesarios

Una vez descrito el funcionamiento general de la cerradura, se pasa al diseño de los componentes mencionados.

Los elementos necesarios para el funcionamiento son los siguientes:

- 1-Solenoides de apertura
- 2-Acople solenoide de apertura
- 3-Brida solenoide de apertura
- 4-Solenoides de cierre
- 5-Acople solenoide de cierre
- 6-Separador solenoide de cierre
- 7-Brida solenoide de cierre
- 8-Solenoides de traba
- 9-Pieza auxiliar para traba
- 10-Brida de solenoide de traba

- 1-Solenoides de apertura

Se utiliza el mismo diseño que el desarrollado en el Capítulo 1, solamente cambiando las dimensiones según la carrera necesaria y garantizar que entre en la cerradura.

Tamaño máximo = Diámetro 14mm x Largo 50mm

Consta de 5 piezas, y es un producto en sí mismo. Las piezas son las siguientes:

- Carcasa de acero de bajo carbono
- Polo de acero de bajo carbono
- Émbolo móvil de acero de bajo carbono
- Buje de bronce
- Portabobinas plástico

- 2-Acople solenoide de apertura

Esta pieza se usa para acoplar y separar el émbolo móvil del solenoide 1 de los pernos de la cerradura, de manera de realizar el movimiento de apertura de la misma. Debe ser de

material no magnético, como aluminio, cobre, bronce, acero inoxidable o plástico. Por costo, simplicidad y facilidad de mecanizado es realizada en este último material.

La razón de la elección de un material no magnético es la siguiente: Ya se había comentado en el capítulo 1 el modo de funcionamiento del solenoide, que consistía en una distorsión del campo magnético debido al émbolo mismo. En el caso que este émbolo esté en una posición cercana a la carcasa de la cerradura, el flujo magnético no se distorsionará lo suficiente, sino que se cerrará a través de toda la carcasa de la cerradura misma. Debido a esto, la pieza de acople además de funcionar como acople mecánico, también funciona como separador, para impedir que el flujo magnético se cierre por el camino de hierro.

### 3-Brida solenoide de apertura

La misma se utiliza para fijar la carcasa del solenoide de apertura a la carcasa de la cerradura, de manera que no exista movimiento relativo entre ambas. Es una pieza sencilla, fabricada con una chapa de poco espesor la cual toma una forma similar a la pieza a fijar, y se ajusta mediante un tornillo a la carcasa de la cerradura. Al ajustar el tornillo, se produce una leve deformación de la brida, la cual aprieta a la carcasa del solenoide, de manera de impedir el movimiento por la fuerza de rozamiento generada.

### 4-Solenoide de cierre

El diseño es idéntico al de apertura, cumple la misma función

### 5-Acople solenoide de cierre

Igual que para el de apertura, esta pieza se utiliza para acoplar y separar el émbolo del solenoide de cierre al frente de la carcasa de la cerradura. Los motivos de la selección del material (plástico) ya fueron discutidos previamente. Es básicamente una arandela separadora de plástico.

### 6-Separador solenoide de cierre

Esta pieza puede ser de cualquier material, y se utiliza para poner a punto el mecanismo de los dos solenoides; no estaba prevista en el diseño original, pero se utilizó en el armado para facilitarlos.

#### 7-Brida solenoide de cierre

Igual que la brida del solenoide de apertura, consiste en una chapa metálica unida al mecanismo móvil (los pernos de la cerradura), y que se acopla con la carcasa del solenoide de cierre. De esta manera es la carcasa la que se mueve y el émbolo el que está fijo en la cerradura.

#### 8-Solenoide de traba

En el pequeño espacio remanente en la carcasa, se agrega un pequeño electroimán, el cual funcionará como traba del mecanismo móvil de la cerradura. Este se utiliza con un resorte en su émbolo de manera de que la posición de reposo del mismo es trabando el mecanismo, y al activar el solenoide el émbolo se mueve hacia dentro destrabándolo.

El diseño es similar a los anteriores, sólo que modificando las dimensiones, las cuales serán las máximas posibles según el espacio libre.

#### 9-Pieza auxiliar de traba

Es una pieza de plástico, la cual va unida a la parte móvil de la cerradura, y cuenta con dos muescas para localizarla en dos posiciones, la posición de cerradura abierta y de cerradura cerrada. Además la misma pieza es utilizada para mover la leva de un microswitch, indicando el estado de la cerradura.

#### 10-Brida de solenoide de traba

Se utiliza para fijar la carcasa del electroimán en la carcasa de la cerradura, es similar a la brida del solenoide de apertura.

## Capítulo 4: Software





## Capítulo 4: Software

### 4.1 Descripción de microcontrolador usado

Este capítulo consiste en describir la parte del sistema de control de la cerradura. El microcontrolador seleccionado es el PIC 16F628A, de marca Microchip. Las principales características del mismo son las siguientes:

- Posee un conjunto reducido de 35 instrucciones (al igual que todos los PIC 16F, que son la gama media de Microchip)
- Oscilador interno de 4MHz, por lo que no hay necesidad de utilizar un oscilador externo.
- La máxima frecuencia de oscilador externo es de 20MHz, dando como resultado un ciclo de máquina de mínimo 200ns.
- Memoria de programa de 2048 localidades de 14 bits.
- Memoria RAM de 225 bytes.
- Memoria EEPROM de 128 bytes.
- 16 terminales de entradas / salidas, en caso de no utilizar ninguna opción extra.
- Módulo de comunicación serie.
- Módulo CCP.

Este modelo de microcontrolador cuenta con dos puertos de entradas / salidas, PORTA y PORTB, en donde algunos de estos son multiplexados con funciones alternativas.

El puerto A (PORTA) es un puerto de 8 bits, desde RA0 hasta RA7. Todos los pines de este puerto, a excepción de RA5, pueden ser configurados como entrada o como salida modificando el registro TRISA.

Los pines RA0, RA1, RA2 y RA3, están por defecto asociados a la función de comparador analógico (entradas analógicas), por lo que para usarlos como entrada o salida digital deben ser configurados.

El pin RA4 está multiplexado con una entrada de reloj y como salida es un colector abierto, por esto para usarlo como salida se debe conectar una resistencia pull-up a Vdd.

El pin RA5 es un disparador Schmitt solo de entrada y sin controlador de salida, es habitualmente usado como MCLR (máster clear, reset externo), y de hecho así será en este proyecto.

Los pines RA6 y RA7 trabajan de entrada como disparador de Schmitt trigger y como salida lógica CMOS. Además si se utiliza un oscilador externo debe ser conectado entre estos dos pines.

El puerto B es también un puerto bidireccional de 8 bits, en donde por software es posible habilitar resistencias de pull-up internas (para usarlo como entradas digitales). Además es multiplexado con otras funciones, tal como interrupciones externas, módulo USART, módulo CCP, temporizadores, etc.

En el presente proyecto se usará como estándar el puerto A para las entradas y el puerto B para las salidas, además también se deberá habilitar la función Usart del micro, ya que se comunicará con el dispositivo lector de RFID y con la PC para debugging.

El software utilizado para la realización del código del microcontrolador ha sido el programa MikroC, luego para programar el micro se utiliza el dispositivo Pic-Kit 3, mediante el programa Pic-Kit 3 programmer.

El programa MikroC utiliza un lenguaje de alto nivel, bastante similar al código C, en el que es posible además de realizar la programación propiamente dicha, configurar los distintos registros para la correcta operación del controlador. Una vez realizado el proyecto, se compila generando un archivo .hex, el cual mediante el otro programa (Pic-Kit 3 programmer) es volcado a la memoria no volátil del microcontrolador, quedando de esta manera programado para el funcionamiento requerido.

## 4.2 Diagrama de flujo

En la figura 4-1 se muestra un diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control de accesos

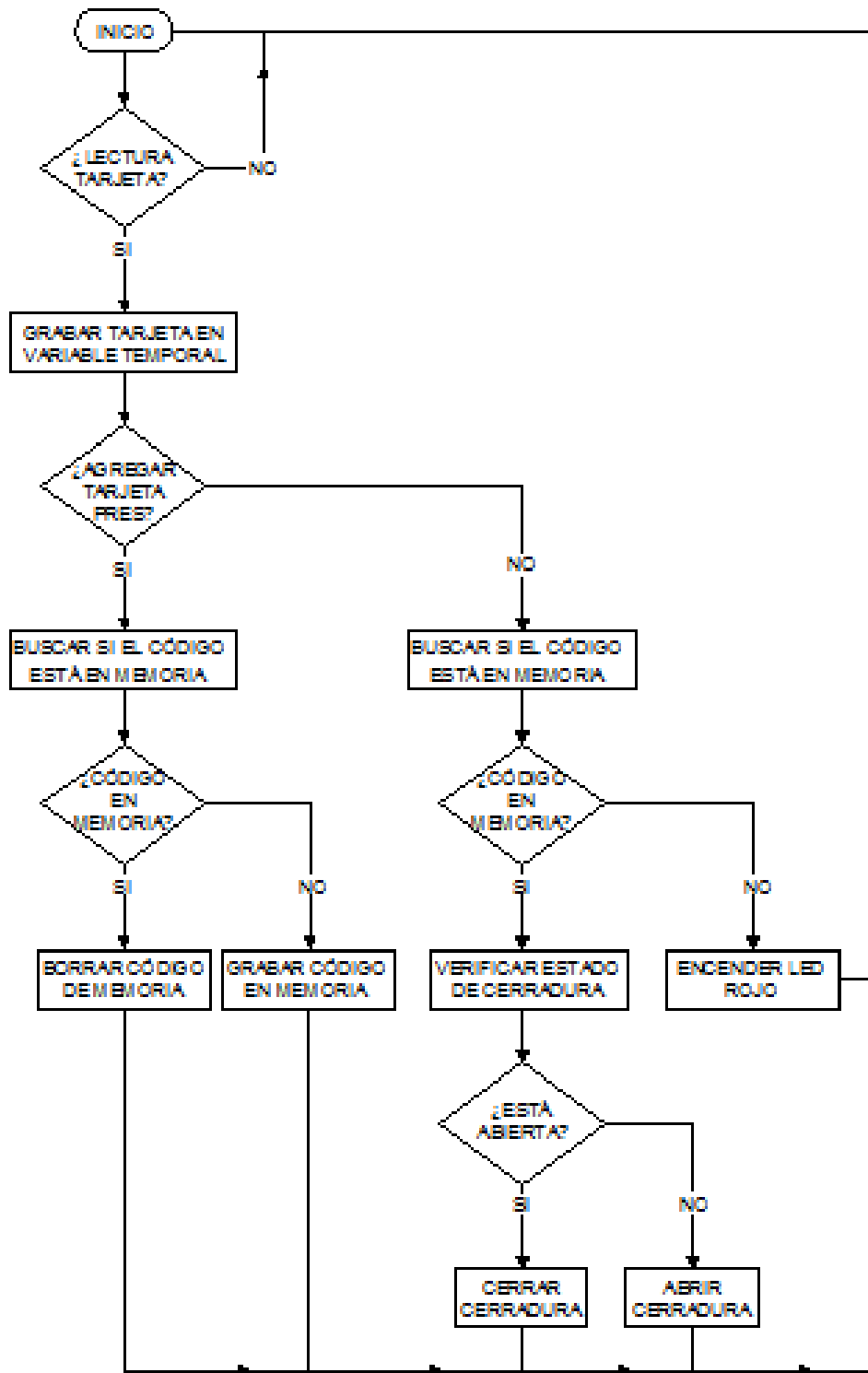


Figura 4-1. Lógica de funcionamiento del sistema de control de acceso

Se observa que el comienzo se da cuando se produce una lectura de tarjeta (se reciben datos desde el lector).

Lo primero que se realiza es grabar esos datos en una variable temporal, de manera de compararlos en los siguientes bloques del programa.

A continuación se verifica si se encuentra presionado el pulsador de agregar / borrar tarjetas, si es así se busca en la memoria si se encuentra el mismo código que ha sido leído. En caso afirmativo se borra el código de la memoria, mientras que en caso negativo se escribe el código, quedando la tarjeta válida para funcionar.

Si el pulsador de agregar / borrar tarjetas no está presionado, se busca también en la memoria el código recién leído, en caso que no esté se prende un led rojo, indicando que la tarjeta no está autorizada. En caso que sí esté en la memoria se procede a realizar la apertura de la cerradura si la misma estaba cerrada, o a realizar el cierre de la misma en caso que haya estado abierta; concluyendo de esta manera el programa principal.

Además hay otras funciones que ocurren directamente presionando ciertos pulsadores, tal como el reset de la memoria, en donde se borran todos los datos almacenados en la EEPROM en caso de pulsarlo, o el de apertura / cierre de cerradura, que se ubica en el interior de la vivienda, y consiste en realizar una apertura o cierre rápido.

## 4.3 Funciones

Para realizar este código se programan ciertas funciones que facilitarán la programación, las mismas son:

### 4.3.1 Función buscar posición vacía

```
void buscarPosicionVacía()
{
    contador = 0;
    posicionMemoria = 0;
    while(contador < 5){
        byte = Eeprom_Read(posicionMemoria);
        posicionMemoria++;
        if(byte == 0xFF)
```

```

        contador++;
    else
        contador = 0;
}
posicionMemoria-=5;
}

```

La misma lee la memoria comenzando por la dirección 0, y cuando encuentra 5 direcciones vacías consecutivas, guarda la primera de esas direcciones en una variable tipo char, llamada posicionMemoria.

### 4.3.2 Función buscar tarjeta

```

char buscarTarjeta()
{
    for(posicionMemoria=0;posicionMemoria<128;posicionMemoria+=5){
        datos[0] = Eeprom_Read(posicionMemoria);
        datos[1] = Eeprom_Read(posicionMemoria+1);
        datos[2] = Eeprom_Read(posicionMemoria+2);
        datos[3] = Eeprom_Read(posicionMemoria+3);
        datos[4] = Eeprom_Read(posicionMemoria+4);
        if((datos[0]==datosDecodificados[0])&&(datos[1]==datosDecodificados[1])&&
            (datos[2]==datosDecodificados[2])&&(datos[3]==datosDecodificados[3]) &&
            (datos[4]==datosDecodificados[4])){
            return 1;
        }
    }
    return 0;
}

```

Esta función busca la tarjeta leída en la memoria, si la encuentra devuelve un 1, caso contrario un 0. De esta manera si el resultado de esta función es un 1 lógico significa que la tarjeta leída se encuentra en la memoria, y si es un 0 lógico la tarjeta leída no se encuentra.

### 4.3.3 Función agregar tarjeta

```
void agregarTarjeta()
{
    for(byte=0;byte<5;byte++)
    {
        Eeprom_Write(posicionMemoria,datosDecodificados[byte]);
        posicionMemoria++;
    }
}
```

La función anterior agrega la tarjeta leída, comenzando por la dirección de memoria almacenada en la variable posicionMemoria.

### 4.3.4 Función borrar tarjeta

```
void borrarTarjeta()
{
    for(byte=0;byte<5;byte++)
    {
        Eeprom_Write(posicionMemoria,0xFF);
        posicionMemoria++;
    }
}
```

Esta simplemente escribe el valor FF (equivalente a memoria vacía), comenzando por la dirección de memoria almacenada en la variable `posicionMemoria`, es decir, borra la tarjeta.

#### 4.3.5 Función abrir cerradura

```
void abrircerradura()
{
    PORTB.F4 = 1;    // activa solenoide de cerrar cerradura para posicionar
    Delay_ms(150);  // tiempo para que el mecanismo actúe
    PORTB.F5 = 1;    // activa solenoide auxiliar para destrabar
    Delay_ms(150);  // tiempo para que el mecanismo actúe
    PORTB.F4 = 0;    // desactiva solenoide de cerrar cerradura
    Delay_ms(150);  // tiempo para que se disminuya el campo magnético
    PORTB.F3 = 1;    // activa solenoide de abrir cerradura
    Delay_ms(1000); // tiempo para que la cerradura se abra
    PORTB.F5 = 0;    // desactiva solenoide auxiliar para trabar mecanismo
    Delay_ms(150);  // tiempo para que trabe el mecanismo
    PORTB.F3 = 0;    // desactiva solenoide de apertura
    Delay_ms(50);   // Fin, cerradura abierta
}
```

La función anterior es la encargada de realizar la apertura de la cerradura, según el procedimiento explicado en el capítulo 4.

#### 4.3.6 Función cerrar cerradura

```
void cerrarcerradura()
{
    PORTB.F3 = 1;    // activa solenoide de apertura cerradura para posicionar
```

```

Delay_ms(150); // tiempo para que el mecanismo actué
PORTB.F5 = 1; // activa solenoide auxiliar para destrabar
Delay_ms(150); // tiempo para que el mecanismo actué
PORTB.F3 = 0; // desactiva solenoide de abrir cerradura
Delay_ms(100); // tiempo para que se disminuya el campo magnético
PORTB.F4 = 1; // activa solenoide de cerrar cerradura
Delay_ms(1000); // tiempo para que la cerradura se cierre
PORTB.F5 = 0; // desactiva solenoide auxiliar para trabar mecanismo
Delay_ms(150); // tiempo para que trabe el mecanismo
PORTB.F4 = 0; // desactiva solenoide de apertura
Delay_ms(50); // Fin, cerradura abierta
}

```

Esta función es la encargada de realizar el cierre de la cerradura.

#### 4.3.7 Parte de función principal

```

{
empezar:
if(PORTA.F1) // si está en alto, borramos la memoria
{
borrarMemoria();
PORTB.F6 = 1;
PORTB.F7 = 1;
Delay_ms(1000);
PORTB.F6 = 0;
PORTB.F7 = 0;
}
if(tarjetaLeida == 1)
{

```

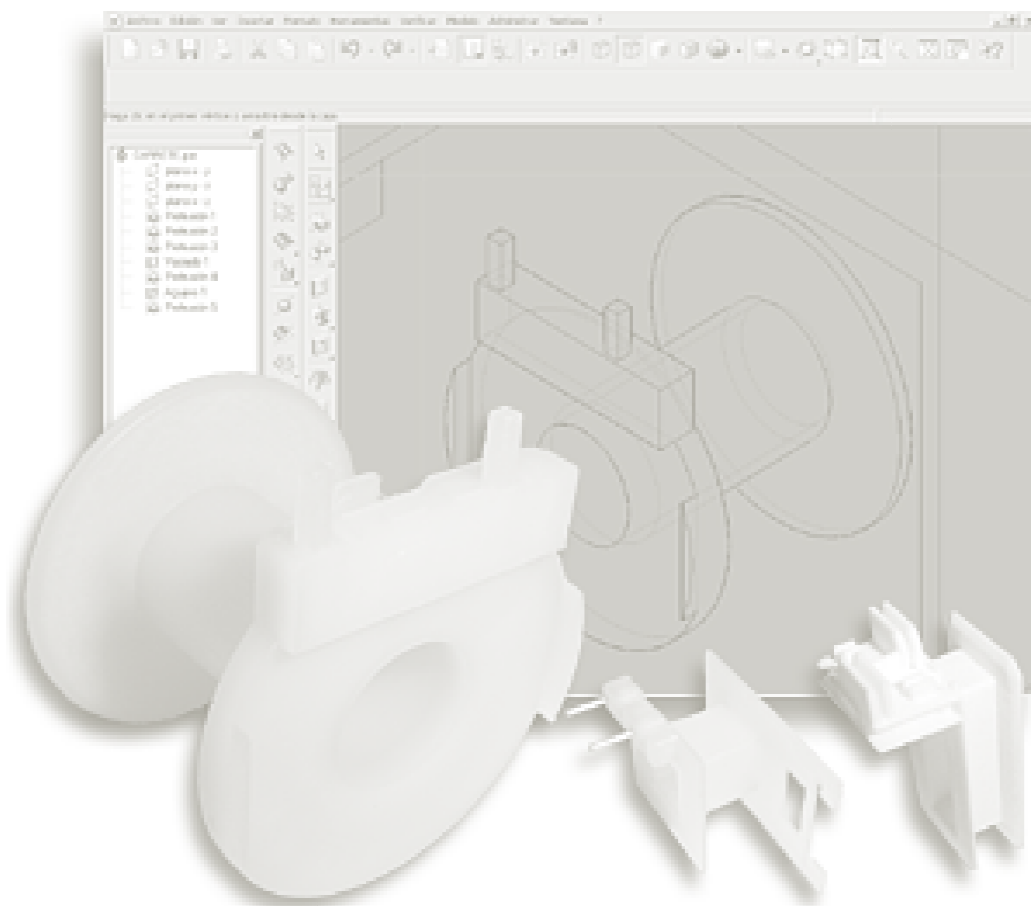


```
if(PORTA.F0) //si está en alto, grabamos o borramos tarjetas
{
    byte = buscarTarjeta(); // llamamos la función buscarTarjeta
    if(byte) //tarjeta encontrada, la borramos
    {
        borrarTarjeta(); // llamamos la función de borrar tarjeta
    }
    else // tarjeta no encontrada, grabar tarjeta
    {
        buscarPosicionVacía(); //llamar función para buscar posición vacía
        agregarTarjeta(); // llamar función para agregar tarjeta
    }
}
else // si RA0 no está en alto, comprobamos si la tarjeta está en memoria
{
    byte = buscarTarjeta(); // llamamos la función buscarTarjeta
    if(byte) //tarjeta encontrada, verificamos si la cerradura está abierta
    {
        if(cerraduraabierta) //si está abierta la cerramos
        {
            cerrarcerradura(); // llamar función para cerrar
            if(PORTA.3 = 0) // si no está sensando el microswitch
                cerraduraabierta = 0; // indica cerradura cerrada
        }
        else // si no está abierta la abrimos
        {
            abrircerradura(); //llamar función para abrir
            if(PORTA.3) // si está sensando el microswitch
                cerraduraabierta = 1; // indica cerradura abierta
        }
    }
}
```

```
else // tarjeta no encontrada, indicamos con un led rojo
{
    PORTB.F7 = 1;
    Delay_ms(500);
    PORTB.F7 = 0;
}
}
goto empezar;
}
```

La anterior es la parte principal del programa, que se encuentra incluido en la función main, que además de el ciclo de trabajo también define los registros del microcontrolador para que funcione de la manera esperada, configura los pines y posee la comunicación serie con el lector RFID.

## Capítulo 5: Fabricación Prototipo



## Capítulo 5 : Fabricación prototipo

En este capítulo se discutirá el proceso de fabricación de los distintos componentes para el armado del prototipo mecánico, y el ensamblaje final junto a la parte de control de la cerradura.

### 5.1 Conjunto cerradura

Está compuesto de 3 elementos perfectamente definidos: la cerradura, el lector RFID y el circuito de control.

La cerradura va empotrada en la puerta, y posee las mismas dimensiones exteriores que una Acytra modelo 101, con la diferencia que actúa electromecánicamente.

El lector RFID va ubicado en el lado exterior de la puerta, a la altura del agujero donde se introducen las llaves en una cerradura común y corriente.

El circuito de control se ubica en el lado interior de la puerta, a la misma altura del lector. De esta manera, el pasaje de cables desde la cerradura y el lector hacia el circuito de control es a través del agujero ya hecho en donde se introducen las llaves, quedando tapado por las cajas eléctricas.

Lo mencionado se puede observar en la Figura 5-1, en donde se muestra la disposición de los componentes que forman el conjunto de la cerradura construida.

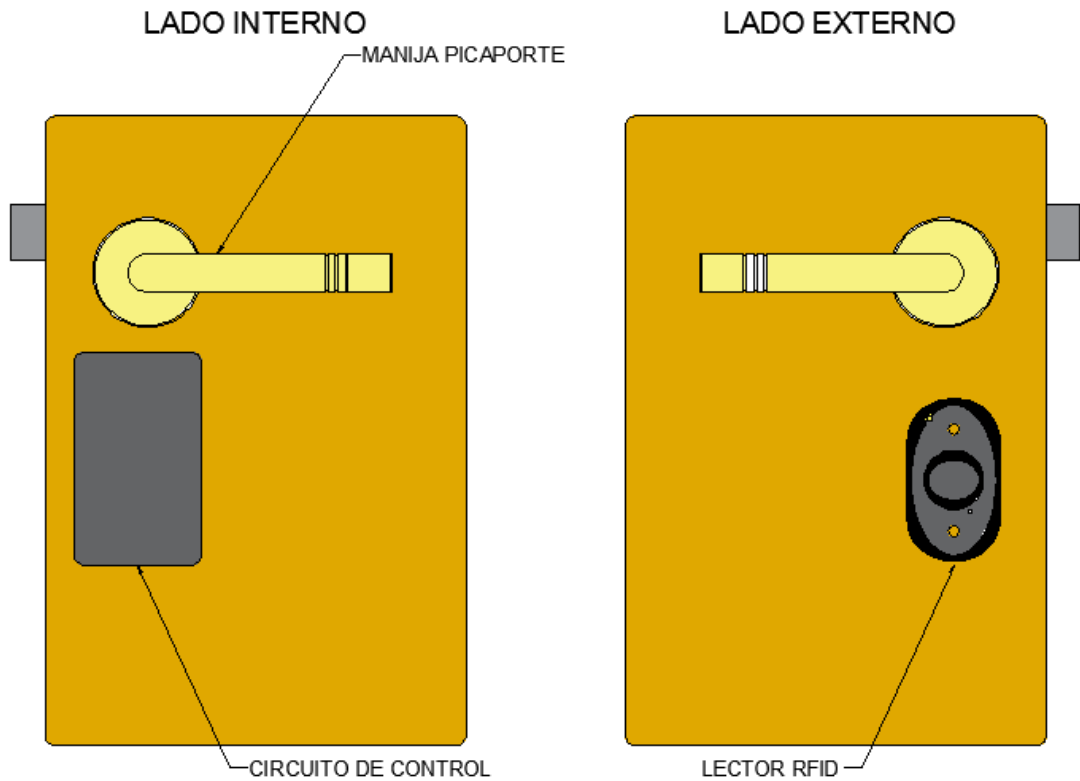


Figura 5-1. Disposición de componentes para el funcionamiento de la cerradura.

## 5.2 Parte mecánica

Las partes principales de la cerradura son los tres solenoides, ya que constan de cinco piezas cada uno, en donde tres son de acero común, una es de bronce y una de plástico.

Además, el espesor de algunas piezas, al ser tan delgado, dificulta el mecanizado.

La pieza más complicada de fabricar es la de plástico, ya que al llegar a los pequeños espesores la herramienta deja de cortar y pasa a deformar elásticamente al material, por lo que al retirarse este vuelve a su forma original. Debido a esto, el mecanizado debe realizarse muy lentamente, con un espesor de pasada pequeño, y acompañado de un macho, de manera que mantenga en posición al material; sin embargo esta operación es compleja y se debe realizar con sumo cuidado.

La otra pieza difícil de realizar es la carcasa, al ser tan poco el espesor (0,5mm), el material pierde rigidez y se deforma permanentemente al pasar la herramienta. También para

solucionarlo el avance y el espesor de pasada deben ser pequeños, y controlando la temperatura de la pieza.

Las otras tres piezas (bujes de bronce, émbolo móvil y polo) no revisten mayor dificultad, quizás el émbolo que al ser su longitud varias veces mayor a su diámetro debe ser localizado en el extremo libre con la contrapunta. Más allá de eso no hay inconvenientes en la fabricación.

Al ser un prototipo, y realizarse solamente 3 solenoides en donde dos son iguales y uno distinto. No justifica utilizar otros métodos de fabricación que no sean un mecanizado. Si bien para una fabricación a mayor escala la pieza de plástico debería ser inyectada, y para la carcasa se utilizaría un tubo de dimensiones similares.

Una vez fabricadas las 15 piezas que conforman los 3 solenoides, se deben bobinar los 3 portabobinas, para ello se utilizará alambre de cobre esmaltado calibre 28AWG, tal como se desarrolló en el Capítulo 1.

Se observa en la Figura 5-2 una foto con los dos electroimanes principales ya fabricados y bobinados.



**Figura 5-2. Electroimanes principales fabricados y bobinados, uno armado y otro no**

Aparece el primer inconveniente en el proceso de armado: el mecanismo del solenoide había sido probado una vez terminado el mecanizado, es decir, el émbolo debe correr libremente por el buje de bronce y a través del portabobinas de plástico, con un leve juego radial. Sin embargo, una vez bobinado el émbolo no corre libre a través del portabobinas. La conclusión es que el alambre de cobre deformó ligeramente al plástico disminuyendo el diámetro interior.

De esta manera, hay que aumentar este diámetro interior utilizando una mecha del diámetro adecuado y mucho cuidado, ya que el alambre de cobre podría verse afectado. Existen dos alternativas para solucionar este problema para una construcción futura. La primera sería aumentar la rigidez del carretel de plástico, incrementando el espesor del material, con la consiguiente pérdida de volumen para el bobinado. De esta manera se disminuyen los Ampere-vueltas del electroimán pero el carretel disminuye su deformación. La segunda, y posiblemente más adecuada, sería considerar la deformación que ocurrirá en el carretel de plástico, de forma de dimensionar el émbolo y el buje de bronce según esta nueva cota.

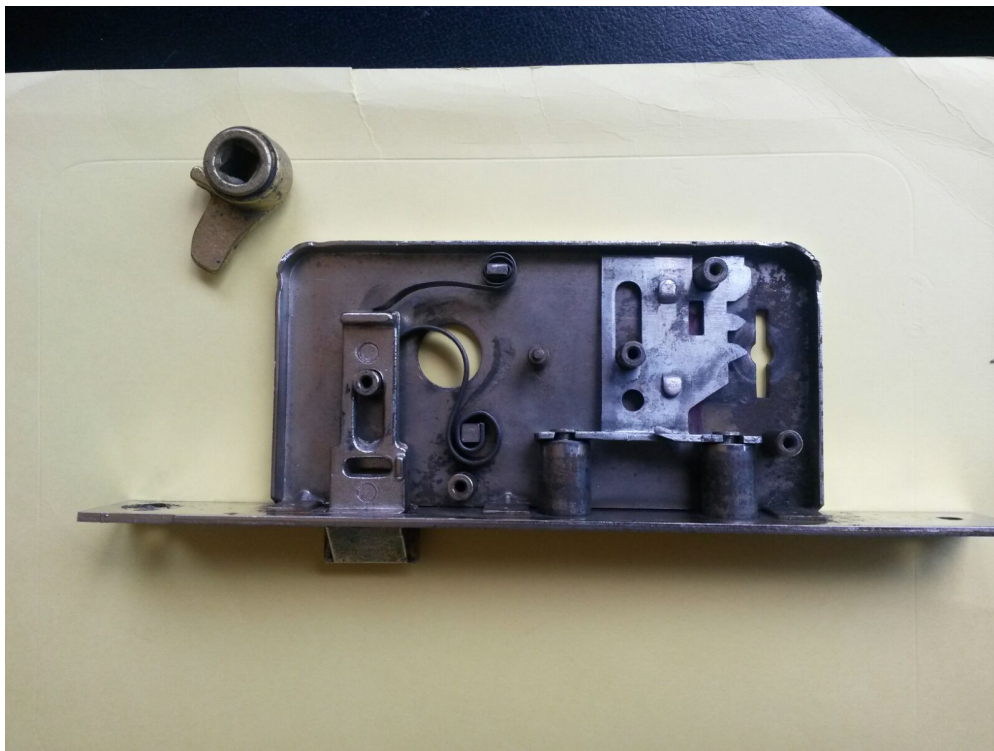
Una vez solucionado este problema, se obtienen los tres solenoides tal como han sido diseñados. Se observa una foto en la Imagen 5-3.



**Imagen 5-3. Foto de los tres electroimanes fabricados.**

El paso siguiente es probar los solenoides con el uso de una fuente de alimentación de 24VDC. Estas pruebas resultan satisfactorias, el comportamiento de los electroimanes es el esperado.

Luego se deben realizar las modificaciones necesarias en la cerradura, se observa en la foto de la Imagen 5-4 el estado de la misma una vez removidos los elementos de la combinación, tal como se comentó en los ítems 3.1 y 3.2.



**Imagen 5-4. Foto de cerradura Acytra modelo 101 removidos los elementos de combinación.**

Se utiliza la carcasa de la cerradura, la nuez, la manija del picaporte, los resortes, y los pernos de fijación junto a la chapa porta pernos.





**Figura 5-5. Proceso de armado de la cerradura.**

En la Figura 5-5 se muestra una fotografía en donde ya se han realizado otras modificaciones, comenzando a agregar los electroimanes principales y localizando el microswitch en el espacio remanente.

Se ha realizado el corte de la chapa, se han colocado las guías de bronce y se están ubicando los solenoides principales. En ese momento, se contemplaba un funcionamiento diferente, en el que los dos electroimanes trabajaban juntos abriendo la cerradura, y mediante el uso de un resorte de compresión se expulsaba los pernos hacia afuera. Sin embargo este sistema fue desechado, ya que existían complicaciones en la alineación de los dos solenoides, y en la fabricación del resorte adecuado. Por estos motivos se realizan unas leves modificaciones en el diseño de manera de que un solenoide realice la apertura y el otro el cierre, sin la utilización de ningún resorte, tal como se explicó en el ítem 3.2.

En la Figura 5-6 se muestra una foto con la cerradura ya prácticamente terminada, con los electroimanes en posición, acoplados mediante las piezas de plástico, el microswitch también localizado en la parte inferior derecha, todos los elementos cableados. A partir de este momento ya es posible comenzar a realizar las pruebas de funcionamiento, las cuales se registran en un vídeo (en este se realiza la apertura y cierre de la cerradura utilizando una electrónica similar a la utilizada finalmente y un código sencillo).

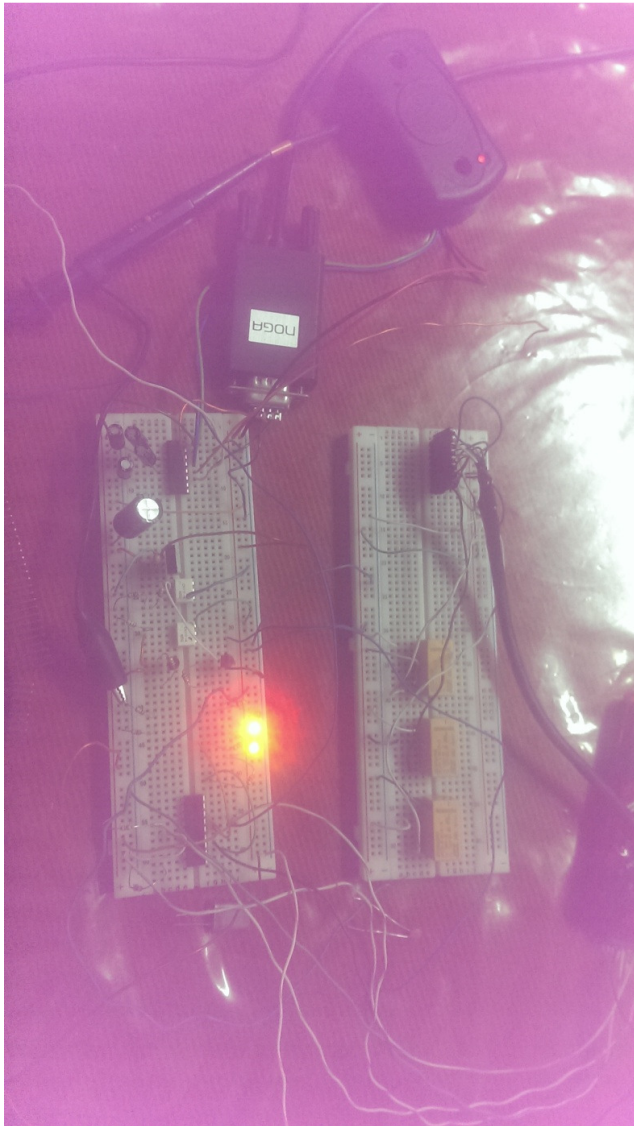
De esta manera se concluye con la parte del armado mecánico, y se continúa con el eléctrico.



Figura 5-6. Foto de cerradura armada.

### 5.3 Armado eléctrico

El primer paso para la construcción de la placa de circuito impreso consiste en probar exhaustivamente el funcionamiento de la cerradura de la manera requerida utilizando una protoboard, tal como se muestra en la Figura 5-7.



**Figura 5-7. Foto de pruebas de circuito eléctrico.**

Luego de esto, una vez que se ha terminado el proceso de pruebas y todo funciona correctamente se procede a realizar el diseño de las pistas del circuito impreso utilizando para ello el programa Eagle V6.3; en la Figura 5-8 se muestra la imagen correspondiente a este proceso.

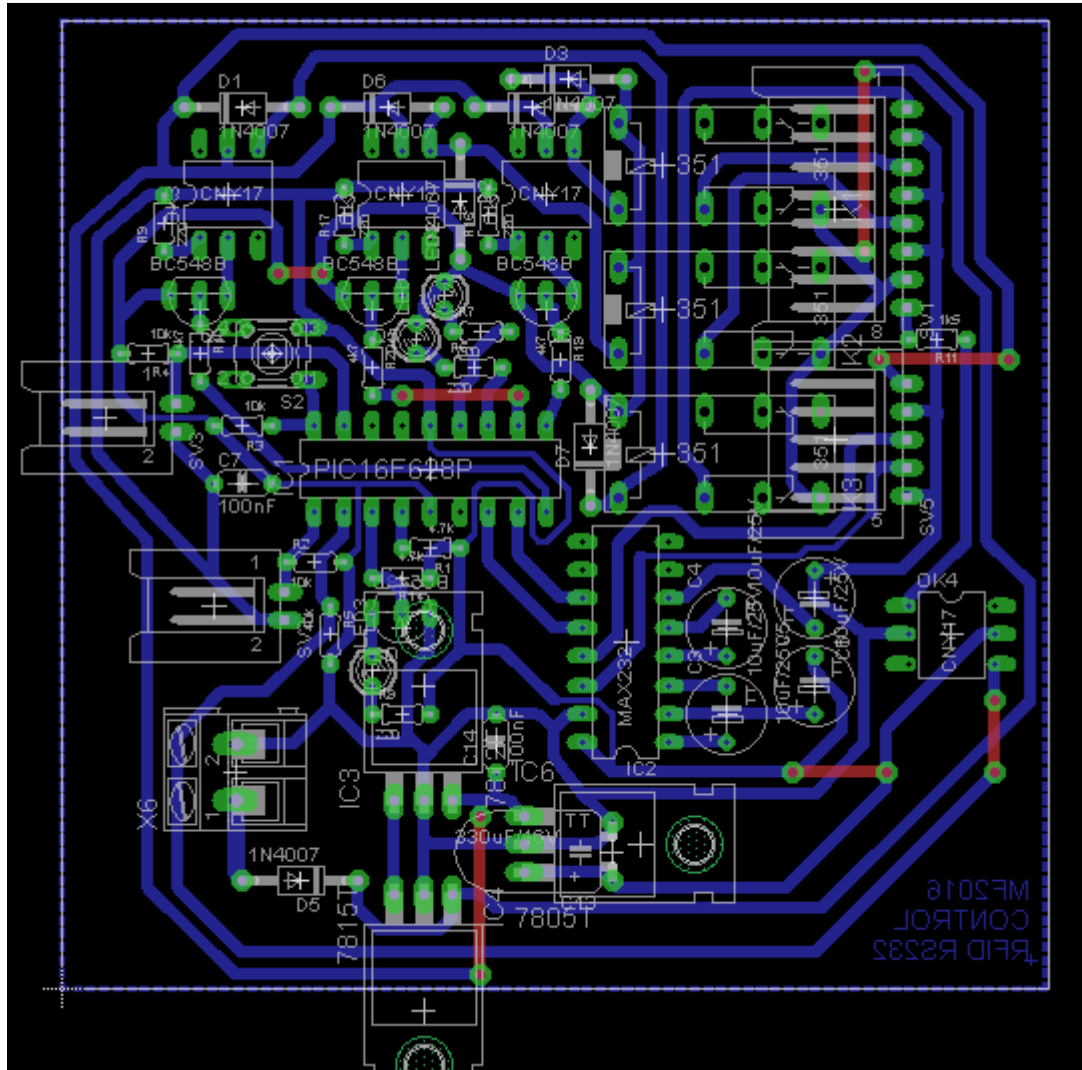


Figura 5-8. Diseño de la placa de circuito impreso usando software Eagle V6.3 Pro

Una vez se ha diseñado el circuito impreso, el paso siguiente consiste en imprimir las pistas en un papel fotográfico, con la máxima calidad de impresión de la impresora láser.

Luego se debe colocar este papel impreso en la placa virgen, con el cobre perfectamente limpio. A continuación se calienta el papel junto con la placa, transfiriéndose de esta manera las pistas impresas en el papel a la placa de cobre.

Una vez el tóner se ha transferido totalmente, se retira el papel fotográfico y se coloca la placa en ácido férrico, que se consigue en casas de electrónica. Este ataca el cobre en las partes que no está protegido por el tóner transferido, de manera de generar las pistas deseadas. Luego de transcurrido un tiempo de 25 minutos, la placa queda como en la Figura 5-9.

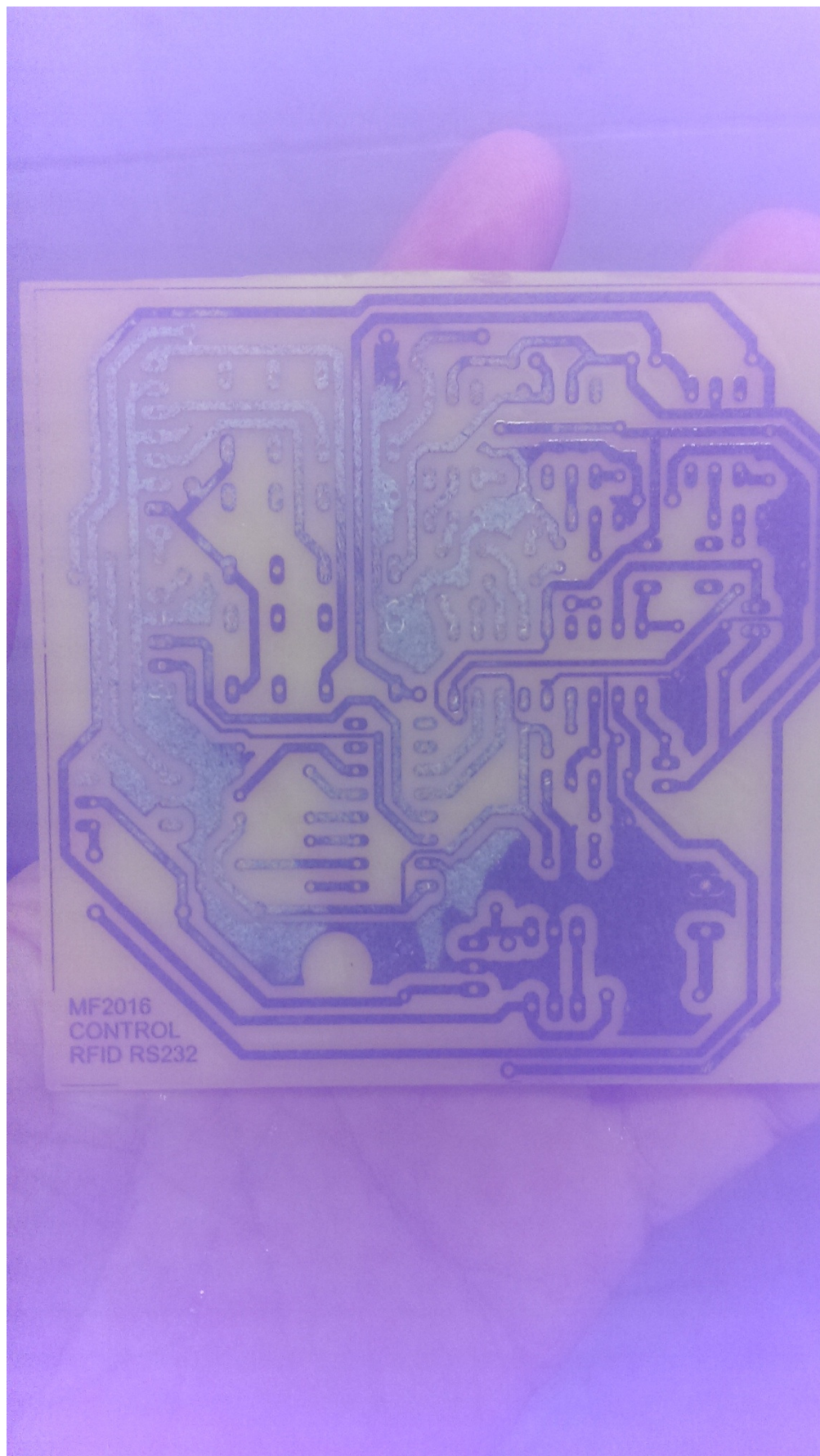
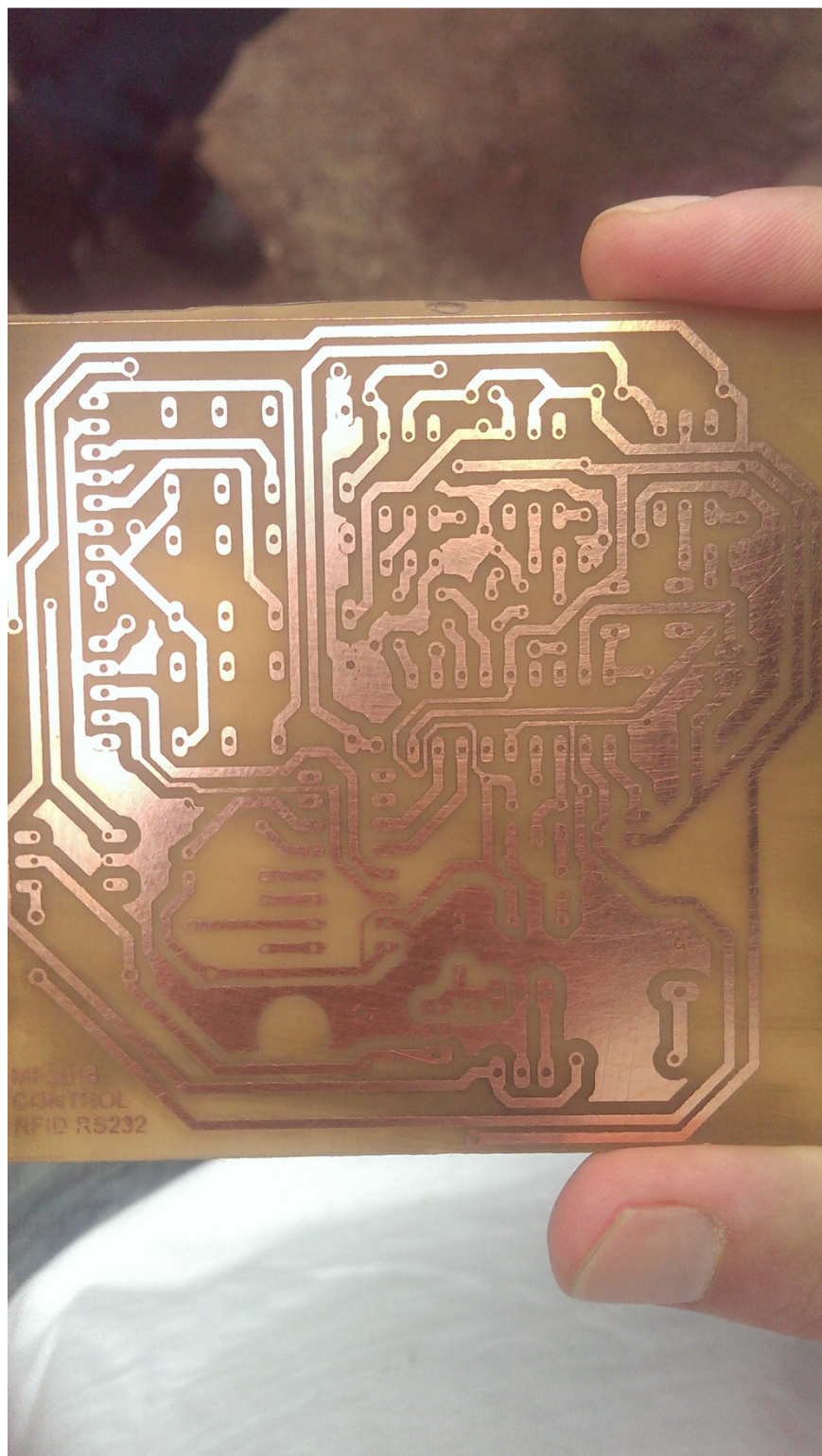


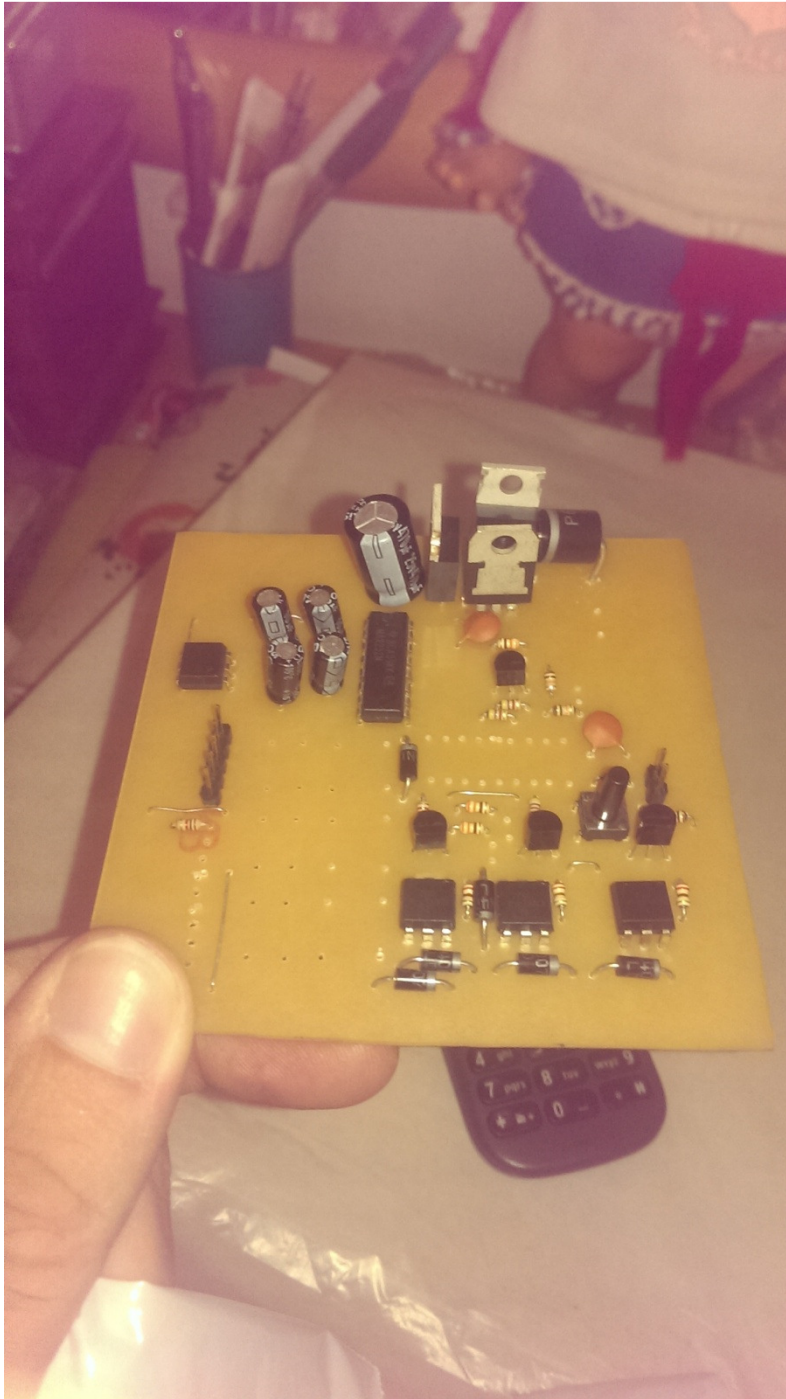
Figura 5-9. Placa de circuito impreso luego de remover el ácido férrico.

A continuación se limpia cuidadosamente el tóner usando tñer, y con cuidado de no levantar ninguna pista de cobre. El resultado se observa en la Figura 5-10.



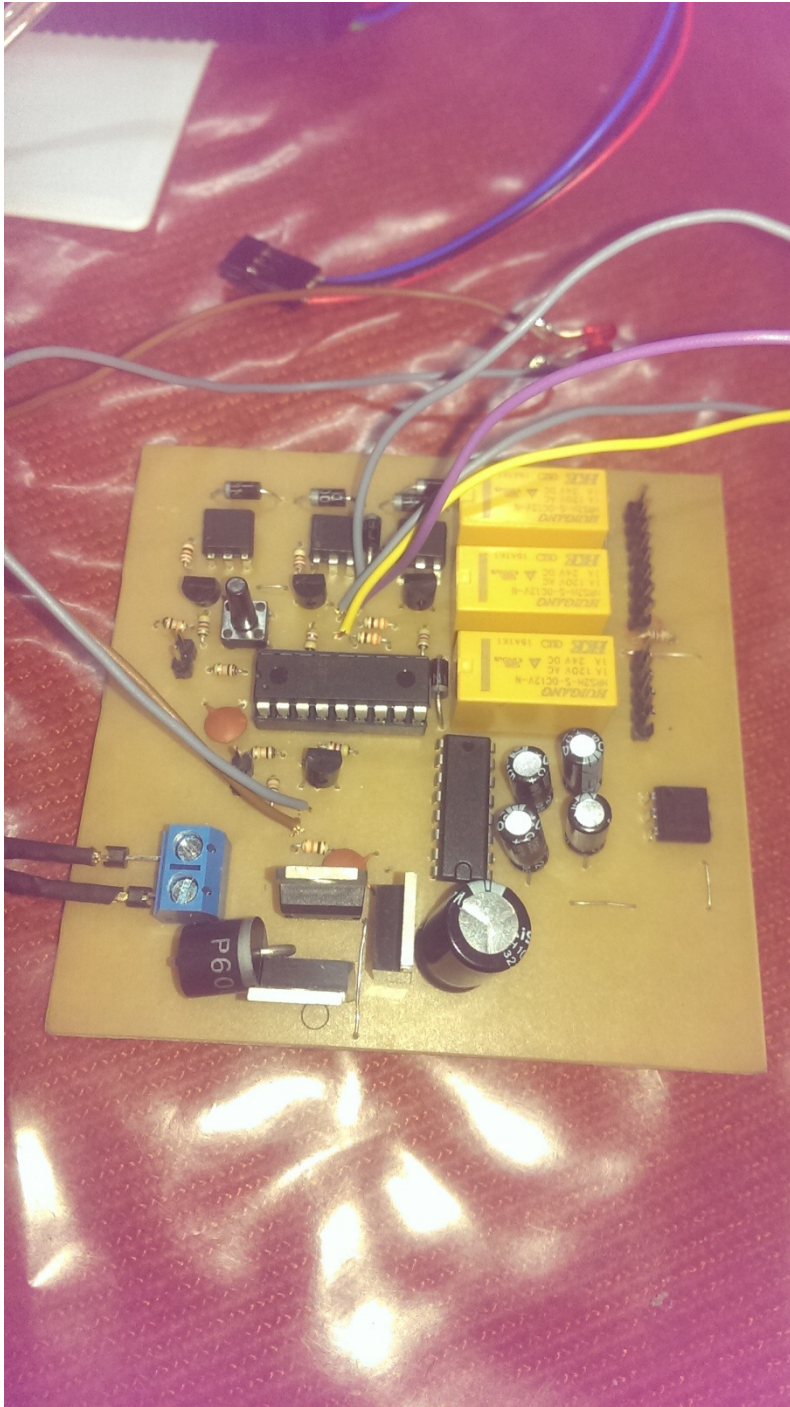
**Figura 5-10. Placa de circuito impreso lavada, se observan las pistas de cobre.**

El paso siguiente consiste en testear las pistas verificando que no existan cortocircuitos entre ellas, especialmente entre los distintos niveles de tensión. Una vez se han corregido los posibles errores se procede a perforar la placa con mechas de 0,75 y 1mm según el componente a colocar. Finalmente se colocan los componentes y se sueldan. Se muestra una foto del proceso de soldado de la placa en la Figura 5-11.



**Figura 5-11. Proceso de soldado de la placa de circuito impreso.**

Una vez soldados todos los componentes, a excepción del microcontrolador, se vuelve a verificar la placa. Una vez que esta está correcta y según el diseño se aplica tensión a la misma y se procede a verificar que los niveles de tensión sean los esperados. Cuando se está seguro que no existen problemas de fabricación, se coloca el microcontrolador y se comienza a realizar las pruebas finales. En la Figura 5-12 se muestra una fotografía con la placa de circuito impreso ya terminada y probada.



**Figura 5-12. Foto de placa de circuito impreso probada.**



## 5.4 Pruebas de la cerradura

Una vez ha sido construida tanto la parte mecánica, como la eléctrica, y se ha cargado el software que funcionaba correctamente en la etapa de debugging, se procede a realizar las ciertas pruebas para garantizar la funcionalidad de la cerradura en su conjunto.

### 5.4.1 Consumo eléctrico en stand-by

En el capítulo 2 de diseño eléctrico se había estimado un consumo del circuito en estado de stand-by de 50mA. Una vez armado, y realizando las mediciones reales se obtiene lo siguiente:

- Consumo microcontrolador PIC16F628A y integrado MAX232 = 20mA
- Consumo led = 10mA cada uno
- Consumo lector RFID = 100mA

Cuando el circuito se encuentra en stand-by, se encuentra energizado tanto el microcontrolador como el lector RFID, y un led está activado, por lo que el consumo del mismo en este estado será de  $20\text{mA} + 10\text{mA} + 100\text{mA} = 130\text{mA}$ . Este es un consumo superior al estimado, por lo que la duración de las baterías será menor al estimado en el ítem 2.4.2.1. Recalculando según este consumo, la duración de las baterías será de

$$\frac{50}{130} * 1,8 \text{ días} = 0,7 \text{ día}$$

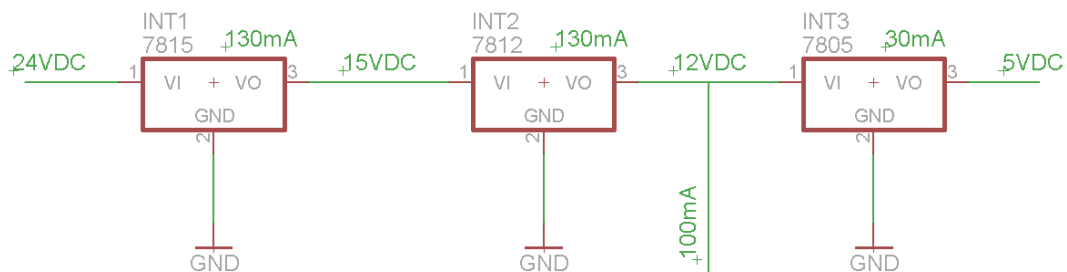
Luego, para incrementar la duración de las mismas se deberá utilizar baterías de mayor capacidad a la mencionada, con el consiguiente aumento en costo.

Para evitar un consumo tan elevado, se podría pensar en habilitar el lector de RFID, de manera tal de activarlo un tiempo determinado cuando se vaya a realizar una apertura, de esta manera, el consumo se reduciría drásticamente, pasando inmediatamente de 130mA actuales a 30mA. Es sin dudas una mejora a realizar en el proyecto, ya que de esta manera se evitan dos cosas: la primera y ya mencionada es el poco tiempo de duración de la batería, la segunda será

analizada en el capítulo siguiente, y tiene que ver con la utilización de disipadores en los integrados de regulación de tensión.

### 5.4.2 Cálculo de disipador en integrados 78XX

El primer paso es realizar el cálculo de la potencia que debe disipar el integrado. El circuito consta de tres integrados, un 7815, para regulación a 15VDC; un 7812, para regulación a 12VDC, y un integrado 7805, para la regulación de 5VDC. De acuerdo a la medición de corriente realizada en el ítem 5.4.1, la corriente circulante normalmente por el 7815 es de 130mA, por el 7812 es de 130mA, y por el 7805 será de 30mA. Además se debe tener en cuenta que la alimentación normal del circuito es de 24VDC, y que los tres se conectan en serie, de manera que la tensión a la salida del primero se corresponde con la entrada del segundo, y la tensión de salida del segundo con la entrada del tercero. Esto se indica en la Figura 5-13



**Figura 5-13. Consumo de integrados 78XX.**

El cálculo de la potencia disipada por cada integrado se realiza de acuerdo a la ecuación 5.1, que consiste en multiplicar la diferencia de tensión aplicada en el regulador por la corriente circulante a través del mismo.

$$P_{78XX} = (V_E - V_S) * I \quad (5.1)$$

Utilizando la ecuación 5.1 para calcular la potencia disipada por cada uno de los integrados se obtienen los siguientes resultados

$$P_{7815} = (24 - 15) * 0,13 = 1,17 \text{ w}$$

$$P_{7812} = (15 - 12) * 0,13 = 0,39 \text{ w}$$

$$P_{7805} = (12 - 5) * 0,03 = 0,21 \text{ w}$$

Se observa que la mayor potencia es la disipada por el primer integrado, y corresponde a 1,17 w estando el circuito en stand-by.

El paso siguiente consiste en determinar la mayor potencia que puede ser disipada por el 78XX sin utilizar un disipador de calor.

Para ello se utiliza la ecuación 5.2, que se coloca a continuación

$$P_{max} = \frac{K * T_j - T_a}{R_{ja}} \quad (5.2)$$

En donde

$P_{max}$  = Potencia máxima sin disipador, en W

$K$  = Coeficiente de seguridad para temperatura de juntura

$T_j$  = Temperatura máxima del semiconductor, en °C

$T_a$  = Temperatura ambiente, en °C

$R_{ja}$  = Resistencia térmica unión – ambiente, en °C/W

El coeficiente K puede tener los siguientes valores

K = 0,5 para un diseño normal con temperatura moderada.

K = 0,6 para economizar el tamaño del disipador

K = 0,7 para cuando el disipador se encuentre en el exterior y en posición vertical

En este caso, al calcular sin disipador, se considerará un K = 0,5

La temperatura máxima del semiconductor, según la hoja de datos del integrado, es de 125°C.

La temperatura ambiente se toma entre 30 y 40°C, en este caso se adopta 35°C.

La resistencia térmica unión-ambiente, depende del tipo del contenedor del circuito integrado, y se saca por tabla. En este caso el integrado es un TO-220, y como se observa en la tabla dada en la Figura 5-14, la resistencia  $R_{ja}$  para un encapsulado de este tipo va desde 60 a 70 °C/W. En este caso se adopta 60 por seguridad.

RESISTENCIA TERMICA UNION-CONTENEDOR Y UNION-AMBIENTE		
Tipo contenedor	$R_{jc}$ [°C/W]	$R_{ja}$ [°C/W] sin aleta
TO.5-TO.39	de 10 a 60	de 175 a 220
TO.202	de 12 a 15	de 80 a 90
TO.126-SOT.32	de 3 a 15	de 80 a 100
TO.220	de 1,5 a 4,2	de 60 a 70
TO.66 plástico	de 1,5 a 4,2	de 60 a 70
TO.3 plástico	de 1 a 2	de 35 a 45
TO.66	de 4 a 5	de 75 a 85
SOT.9	de 4 a 5	de 75 a 85
TO.59	de 1,5 a 3	de 70 a 90
TO.60	de 1,5 a 3	de 70 a 90
TO.3	de 0,8 a 3	de 30 a 40
TO.117	de 15 a 35	de 70 a 90
SOT.48	de 1,8 a 6	de 40 a 70
SOE.2	de 1,8 a 6	de 40 a 70
DIAL.4L	de 1,2 a 5,6	de 40 a 70

Figura 5-14. Datos de resistencia unión-encapsulado y unión-ambiente según tipo de contenedor.

Finalmente, utilizando la ecuación 5.2 se obtiene la máxima potencia admisible sin disipador de calor

$$P_{max} = \frac{0,5 * 125 - 35}{60} = 0,45W$$

Las conclusiones son las siguientes

$$P_{7815} = 1,17 \text{ w} > 0,45 = P_{max} \quad \text{Se necesita disipador de calor}$$

$$P_{7812} = 0,39 \text{ w} \approx 0,45 = P_{max} \quad \text{Se necesita disipador de calor}$$

$$P_{7805} = 0,21 \text{ w} < 0,45 = P_{max} \quad \text{No se necesita disipador de calor}$$

A continuación se calculará el disipador de calor para los integrados 7815 y 7812.

Para realizar esto, se utiliza la ecuación 5.3, con la que se calcula la resistencia térmica que debe poseer el disipador a colocar.

$$R_d = \frac{K * T_j - T_a}{P_{78XX}} - R_{jc} - R_{cd} \quad (5.3)$$

En donde

$R_d$  = Resistencia térmica máxima del disipador, en °C/W

$R_{jc}$  = Resistencia térmica unión y encapsulado, en °C/W

$R_{cd}$  = Resistencia térmica encapsulado y disipador, en °C/W

$R_{jc}$  se localiza en la tabla presente en la Figura 5-14, y va de 1,5 a 4,2 para el tipo de encapsulado empleado. Según la hoja de datos del integrado, el valor es típicamente igual a 4°C/W.

$R_{cd}$  depende del aislante empleado, si se aplica silicona térmica o no, etc. Viene determinado por una tabla, la cual se muestra en la Figura 5-15. Instalando el disipador sin mica y con contacto directo (la manera más sencilla), el valor es de 0,8°C/W.

Usando la ecuación 5.3, se obtiene entonces el valor de la resistencia térmica máxima que deberá poseer el disipador.

$$R_d = \frac{0,5 * 125 - 35}{1,17} - 4 - 0,8 = 18,7^{\circ}C/W$$

Este es un valor bastante elevado, y prácticamente cualquier disipador conseguido en el mercado posee una resistencia térmica menor, además al estar sobredimensionado debido al coeficiente de seguridad, el funcionamiento del integrado será adecuado.

RESISTENCIA TERMICA CONTENEDOR-DISIPADOR				
Tipo de conenedor	Contacto directo sin mica	Contacto directo y silicona	Contacto con mica	Contacto con mica silicona
TO.5	1	0,7	--	--
TO.39	1	0,7	--	--
TO.126	1,4	1	2	1,5
TO.220	0,8	0,5	1,4	1,3
TO.202	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.152	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.90	0,5	0,3	1,2	0,9
TO.3 P.	0,4	0,2	1	0,7
TO.59	1,2	0,7	2,1	1,5
TO.117	2	1,7	--	--
SOT.48	1,8	1,5	--	--
DIA.4L	1,1	0,7	--	--
TO.66	1,1	0,65	1,8	1,4
TO.3	0,25	0,12	0,8	0,4

Figura 5-15. Resistencia térmica de encapsulado-disipador

### 5.4.3 Características de electroimanes principales y electroimán auxiliar

Una vez construidos, es posible medir los valores de resistencia e inductancia de los electroimanes. Se resumen en la Tabla V

Tabla V. Datos característicos de los electroimanes

	R <sub>a</sub> [ohm]	Ind <sub>max</sub> [mHy]	Ind <sub>min</sub> [mHy]	vueltas	AWG	I a 20VDC [A]
Electroimán apertura	4.7	10.9	2.9	680	28	3.7
Electroimán cierre	4.8	9.2	3.2	680	28	3.7
Electroimán auxiliar	2.4	1.15	0.52	200	30	6

Tal como se muestra en la Tabla V, los electroimanes principales están bobinados con alambre de cobre calibre 28, mientras que el electroimán auxiliar con calibre 30. Esto es debido a que el electroimán auxiliar es más pequeño, y de esta manera la resistencia del mismo se incrementa (entran más vueltas de un alambre de mayor resistencia por longitud).

Se puede realizar una rápida estimación del incremento de la temperatura basándose en la corriente circulante, en la última columna de la Tabla V, y la resistencia a temperatura ambiente de los electroimanes.

Para ello se utiliza la ecuación 5.4, que vincula la variación de resistencia con la variación de temperatura, de la siguiente manera.

$$R = R_a(1 + \alpha * \Delta T) \quad (5.4)$$

En donde

$R$  = Resistencia del conductor en la temperatura final, en  $\Omega$

$R_a$  = Resistencia del conductor en la temperatura ambiente, en  $\Omega$

$\alpha$  = coeficiente de variación térmica, en  $1/^\circ C$

$\Delta T$  = diferencia de temperatura, en  $^\circ C$

Despejando  $\Delta T$  de la ecuación 5.4, se puede obtener la ecuación 5.5, en donde la incógnita es la variación de temperatura, y conociendo la temperatura ambiente es posible determinar la temperatura final del conductor de alambre de cobre esmaltado.

$$\Delta T = \frac{\frac{R}{R_a} - 1}{\alpha} \quad (5.5)$$

Para conocer la resistencia a la temperatura que se calculará, se utiliza simplemente la ley de Ohm (Ecuación 5.6), ya que se conocen la tensión aplicada y la corriente circulante por los bobinados luego de 1 segundo (la columna 7 de la Tabla V).

$$\Delta V = \frac{I}{R} \quad (5.6)$$

Al despejar la resistencia de la Ecuación 5.6, y reemplazarla en la Ecuación 5.5, se obtiene la Ecuación 5.7, que será utilizada para calcular la variación de temperatura luego de que circule corriente por el bobinado por un segundo.

$$\Delta T = \frac{\frac{\Delta V}{I * R_a} - 1}{\alpha} \quad (5.7)$$

Calculando la variación de temperatura para los electroimanes principales

$$\Delta T = \frac{\frac{20}{3,7 * 4,7} - 1}{0,004} = 37,5^{\circ}C$$

Calculando ahora la variación de temperatura para el electroimán auxiliar

$$\Delta T = \frac{\frac{20}{6 * 2,4} - 1}{0,004} = 97,2^{\circ}C$$

Suponiendo que la temperatura ambiente al momento de la medición de  $R_a$  haya sido de  $25^{\circ}C$ , la temperatura final alcanzada en el bobinado auxiliar luego de un segundo de circular la corriente nominal será de  $125^{\circ}C$  aproximadamente; mientras que para los electroimanes principales de  $65^{\circ}C$ .

El alambre de cobre utilizado es de clase F, por lo tanto la temperatura máxima admisible que puede soportar es de  $155^{\circ}C$ . Por lo tanto es posible la actuación de los solenoides bajo esas corrientes pero por tiempos cortos, es decir, por impulsos.



### 5.4.4 Cálculo del mecanismo de cerradura

Para garantizar el funcionamiento de la cerradura, se deben garantizar tres movimientos: el movimiento de apertura de la cerradura, realizado por el electroimán 1, partiendo desde una posición de reposo con la cerradura cerrada. El movimiento de cierre de la cerradura, realizado por el electroimán 2, partiendo desde una posición de reposo con la cerradura abierta, similar al anterior. Y el movimiento de destrabar / trabar, realizado por el electroimán 3, y el resorte auxiliar para retorno del émbolo.

Los dos primeros movimientos son similares, es decir, el cálculo para ambos es igual, por lo tanto una vez se obtengan los resultados para uno, son los mismos para el otro.

Para el tercero, en cambio, es necesario calcular tanto el movimiento de destrabe de la cerradura (el electroimán vence al resorte), y el de retorno (el resorte lleva al émbolo a la posición de reposo).

#### 5.4.4.1 Mecanismo de apertura y cierre

Para calcular este movimiento, la fuerza de atracción del electroimán a la carrera máxima (con el émbolo fuera de la carcasa) debe ser mayor a la fuerza de rozamiento de los pernos con la carcasa de la cerradura, aplicando un coeficiente de seguridad.

Primero se calculará la fuerza del solenoide en la máxima carrera, que es de 16mm. Esto se realiza con la ecuación 1.5 vista en el ítem 1.1 (Diseño de electroimán) en el capítulo 1.

$$F = \frac{(N * I)^2 * \mu_0 * S}{2 * g^2} \quad (1.5)$$

Reemplazando valores, según los datos obtenidos en la Tabla V.

$$F = \frac{(680 * 3,7)^2 * 4\pi 10^{-7} * \frac{\pi}{4} * 6^2}{2 * 15^2} = 0,5N = 50gr$$

La fuerza de atracción a la máxima carrera será de 50 gramos.

El paso siguiente es calcular la fuerza de rozamiento, mediante la aplicación de la Ecuación 5.8. Además se utiliza la Figura 5.16, en la que se muestra un esquema de puntos de contacto entre la parte fija y la parte móvil de la cerradura, y la Tabla VI, en la que se observan distintos coeficientes de rozamiento estáticos.

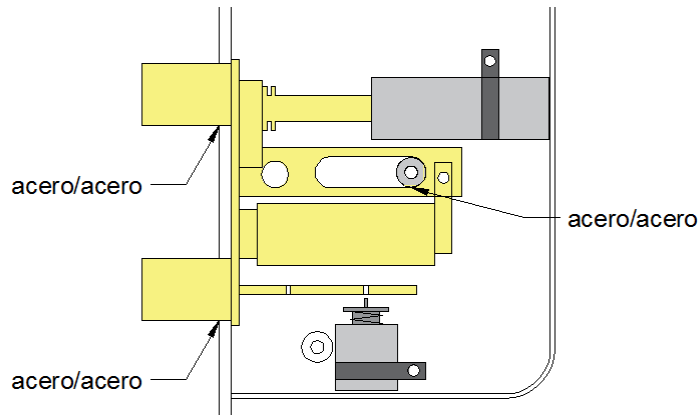


Figura 5-16. Puntos de contacto para móvil de la cerradura con parte fija

Tabla VI. Coeficiente de rozamiento entre sustancias

Coeficientes de rozamiento de algunas sustancias		
Materiales en contacto	$\mu_e$	$\mu_d$
Articulaciones humanas	0,02	0,003
Acero // Hielo	0,03	0,02
Acero // Teflón	0,04	0,04
Teflón // Teflón	0,04	0,04
Hielo // Hielo	0,1	0,03
Esquí (encerado) // Nieve (0°C)	0,1	0,05
Acero // Acero	0,15	0,09
Vidrio // Madera	0,2	0,25
Caucho // Cemento (húmedo)	0,3	0,25
Madera // Cuero	0,5	0,4
Acero // Latón	0,5	0,4
Madera // Madera	0,7	0,4
Madera // Piedra	0,7	0,3
Vidrio // Vidrio	0,9	0,4
Caucho // Cemento (seco)	1	0,8
Cobre // Hierro (fundido)	1,1	0,3

$$F_R = k * \mu * N \tag{5.8}$$

Como se observa en la ecuación 5.8, la fuerza de rozamiento es igual al peso de la parte móvil (150 gr) multiplicada por el coeficiente de rozamiento correspondiente a los materiales en contacto, y por un coeficiente de seguridad que se tomará igual a 2. Como se observa en la Tabla VI, el coeficiente de rozamiento entre el acero y el acero es de 0,15. Reemplazando estos valores en la Ecuación 5.8 se obtiene el valor de la fuerza de rozamiento, que debe ser menor al valor de la fuerza de atracción del electroimán, calculado anteriormente.

$$F_R = 2 * 0,15 * 150 = 45gr < 50gr = F$$

El resultado obtenido indica que la fuerza del electroimán es suficiente para iniciar el movimiento, además se debe considerar lo siguiente:

- La fuerza de rozamiento está afectada por un coeficiente de seguridad de 2.
- El coeficiente de rozamiento será menor al indicado en la Tabla VI ya que el mecanismo está lubricado.
- Una vez comenzado el movimiento, la fuerza de atracción del electroimán aumenta exponencialmente, mientras que la fuerza de rozamiento cae al disminuir el coeficiente de rozamiento debido al movimiento.

Por los motivos mencionados en el párrafo anterior, el movimiento de apertura y cierre de la cerradura está garantizado, lo que se comprueba con el prototipo.

#### **5.4.4.2 Mecanismo de movimiento auxiliar**

Consta de dos movimientos, el primero es el del movimiento del émbolo hacia dentro de la carcasa del electroimán, venciendo al resorte, y el segundo es el retorno del mismo hacia su posición de reposo.

Por lo tanto, para que el resorte logre llevar al émbolo a su posición inicial, la fuerza realizada por el mismo en la posición de menor compresión deberá ser mayor al peso del émbolo. Y para que el electroimán logre vencer al resorte, la fuerza realizada por el mismo sumada al peso del émbolo deberá ser mayor a la del resorte en todas las posiciones.

El primer paso será calcular el peso del émbolo, lo cual es sencillo debido a la forma cilíndrica del mismo.

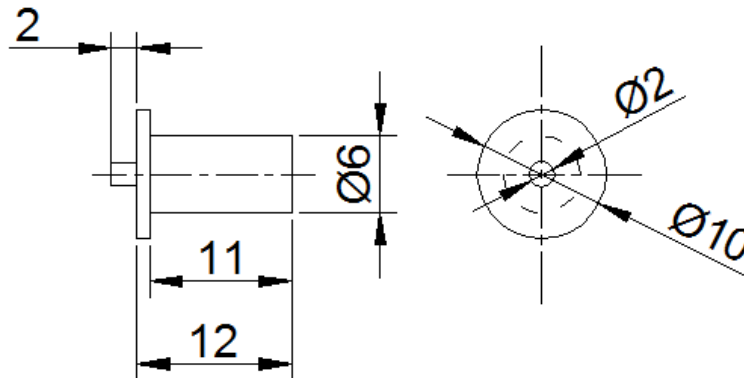


Figura 5-17. Esquema del émbolo para el cálculo de su peso.

Para calcular el peso del émbolo se utiliza el esquema mostrado en la Figura 5-17 y la Ecuación 5.9.

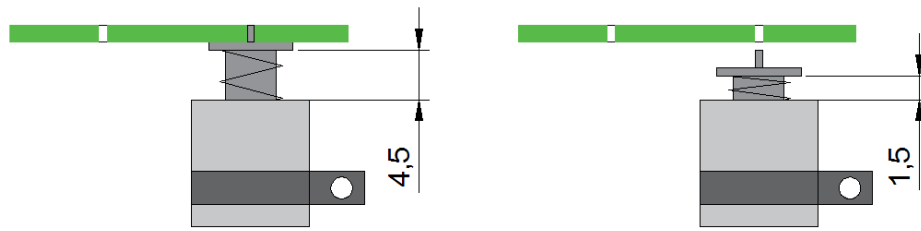
$$P_{embolo} = \rho \frac{\pi}{4} (l_1 * D_1^2 + l_2 * D_2^2 + l_3 * D_3^2) \quad (5.9)$$

Teniendo en cuenta que el material es acero, y posee un peso específico de  $0,0078 \text{ gr/mm}^3$ , reemplazando los valores de la Figura 5-17 en la Ecuación 5.9,

$$P_{embolo} = 0,0078 * \frac{\pi}{4} (2 * 2^2 + 1 * 10^2 + 11 * 6^2) = 3 \text{ gr}$$

El peso del émbolo es de 3 gramos.

Luego se calculará la fuerza del electroimán en 2 puntos, en la máxima carrera y en un punto intermedio, para ello se utilizará la Ecuación 1.5, con los datos de la Tabla V, y conociendo la carrera máxima, determinada en la Figura 5-18 (3mm).



**Figura 5-18. Movimiento de émbolo de electroimán auxiliar.**

$$F_{min} = \frac{(200 * 6)^2 * 4\pi 10^{-7} * \frac{\pi}{4} * 6^2}{2 * 3^2} = 2,84 = 284\text{gr}$$

$$F_{puntointermedio} = \frac{(200 * 6)^2 * 4\pi 10^{-7} * \frac{\pi}{4} * 6^2}{2 * 2,5^2} = 4,1 = 410\text{gr}$$

El último paso consiste en determinar la constante del resorte, de la siguiente manera. Cuando el resorte esté extendido en posición, tendrá una longitud de 4,5mm (Figura 5-18), y deberá poseer una fuerza mayor al peso del émbolo y menor a la fuerza mínima del electroimán, es decir, un valor comprendido entre 3gr y 284gr (se utiliza el promedio entre ambas, 140gr). Cuando el resorte está comprimido, tendrá una longitud de 1,5mm, y deberá poseer una fuerza menor a la fuerza del electroimán en un punto intermedio, de 410gr. Finalmente, cuando el resorte esté completamente extendido, tendrá una longitud de 7,5mm.

Con los datos anteriores, es posible calcular una constante  $k$  del resorte, aplicando la Ecuación 5.10, que es la Ley de Hooke.

$$F_{resorte} = k * (x - x_0) \quad (5.10)$$

Despejando el valor de k, y para la primera condición (el valor de fuerza igual a 140gr para una posición del resorte en 4,5mm)

$$K = \frac{F_{\text{resorte}}}{(x - x_0)} = \frac{140}{4,5 - 7,5} = -47 \text{ gr/mm}$$

Con esta constante del resorte, el valor de la fuerza para la posición extendida en posición será de 140gr. A continuación se calcula el valor para la posición de fin de carrera.

$$F_{\text{resorte}} = -47 * (1,5 - 7,5) = 280 \text{ gr}$$

El valor para la posición final de carrera es de 280 gramos, por lo tanto el funcionamiento del resorte es válido, al ser menor que el valor de fuerza del electroimán para esa posición.

Finalmente, con estos resultados obtenidos se garantizan los movimientos auxiliares de trabar y destrabar la cerradura.

## **Capítulo 6: Análisis y conclusiones finales**



## Capítulo 6: Análisis y conclusiones finales

### 6.1 Análisis de costos

Lo primero a realizar en este capítulo es un estudio de costos de la fabricación de la cerradura.

Para ello se dividen los costos en dos partes: parte mecánica y parte eléctrica

#### 6.1.1 Costos parte mecánica

El costo principal es el de la cerradura, una cerradura Acytra modelo 101 cuesta alrededor de \$400, pero, al no utilizarse todas sus partes (se quitan las combinaciones y las llaves) se estima un costo de \$300 para la misma.

Sigue el costo de fabricación de los electroimanes. Al ser piezas pequeñas y sencillas de realizar, el costo de la materia prima es prácticamente nulo, el único relevante es el tiempo dedicado a la fabricación. Con un proceso adecuado para una fabricación a gran escala, también será pequeño. Por lo tanto se estima un costo final de \$70 por cada electroimán ya en funcionamiento.

Las siguientes son las piezas plásticas de acople y el microswitch mecánico. Los costos de estas dos se estiman en \$50 total.

Para el armado de la cerradura se toma un 10% del costo total de los componentes mecánicos.

En la Tabla VII se resume lo anterior mencionado



**Tabla VII. Resumen de costos mecánica de la cerradura**

Costos parte mecánica			
Componente	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
Cerradura Acytra modelo 101	1	300	300
Electroimán	3	70	210
Piezas de acople plásticos	4	10	40
Microswitch mecánico	1	10	10
Tornillería, piezas pequeñas	1	20	20
Armado (10% del valor total)	1	58	58
<b>Total</b>			<b>638</b>

El costo total de la parte mecánica de la cerradura asciende a \$640, no parece un valor elevado, teniendo en cuenta que el modelo 101 de Acytra está en el orden de los \$400 como ya se había comentado.

### 6.1.2 Costos parte eléctrica

Al igual que en la parte anterior, se procede a realizar la Tabla VIII con el estudio de costos, pero ya de los componentes terminados, y separados como productos individuales. La misma se presenta a continuación.

**Tabla VIII. Resumen de costos mecánica de la cerradura**

Costos parte eléctrica			
Componente	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
lector RFID	1	300	300
circuito de comando y control	1	200	200
Batería 12V 2Ah	1	150	150
Cajas y pulsadores	1	100	100
<b>Total</b>			<b>750</b>

El lector RFID se presenta como un producto definido, con un valor de \$300. Mientras el circuito de comando también, por lo tanto es posible un cambio del tipo de lector (por ejemplo usando un lector biométrico, o un teclado alfanumérico). Además se debe considerar el costo de la batería a usar y de los respectivos pulsadores y cajas eléctricas.

### 6.1.3 Costo total producto

Finalmente, luego de analizados los costos de los dos componentes (parte eléctrica y mecánica), se llega al costo total del producto, el mismo se observa en la Tabla IX.

**Tabla IX. Resumen de costo total de la cerradura**

Costo Total cerradura			
Componente	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
Parte mecánica	1	638	638
Parte eléctrica	1	750	750
<b>Total</b>			<b>1388</b>

Pasando el costo a dólares, se obtiene el valor aproximado de US\$100, que no parece exagerado, teniendo en cuenta que la sencillez de la instalación. Además en una búsqueda por los principales sitios de compras por Internet se pueden obtener precios similares, es decir, se encuentra dentro del rango de precios del mercado. Con la ventaja que posee las mismas dimensiones y características de una cerradura estándar, cosa que no ocurre con las cerraduras electrónicas encontradas habitualmente.

## 6.2 Conclusiones finales

Finalmente luego de fabricado y probado el prototipo se llega a las siguientes conclusiones:

- El funcionamiento de la cerradura es bastante sencillo e intuitivo, además es una gran ventaja que por las dimensiones de la misma pueda ser intercambiada por cualquier cerradura estándar.
- Existe sin embargo un gran inconveniente: el consumo eléctrico. En el momento de realizar la apertura o cierre de la cerradura, se accionan dos solenoides a la vez (ya sea el de traba y el de apertura o el de traba y el de cierre). El consumo del solenoide de traba es de 6 A aproximadamente, mientras que el consumo de

los otros dos solenoides (son iguales) es de 3,7 A cada uno. Esto significa que en el momento en que están accionados los dos, se estará consumiendo un total de casi 10 A. Independientemente de si el tiempo en que esto suceda es corto o largo, se considera que es un consumo bastante elevado para la cerradura. Este alto consumo hace que sea necesario una alimentación permanente de la energía eléctrica domiciliaria, con una batería de soporte, y no a través de la batería como medio principal. Esto es porque al existir tanto consumo simultáneo, aunque la batería completamente cargada lo puede entregar sin problemas, a media carga pueden existir inconvenientes y que la cerradura directamente no abra o cierre porque la batería ya no pueda entregar esa corriente al nivel de tensión requerido.

- Por el motivo anterior se contempla que debe existir un cambio de diseño, de manera que sólo un solenoide esté activo, y no dos simultáneamente. Para ello podría utilizarse un pequeño motor de DC como reemplazo del solenoide de traba, o el diseño de algún mecanismo que permita mantener el émbolo del mismo en dos posiciones estables, de forma que con un pulso se pueda trabar o destrabar el mecanismo.

También se podría basar el diseño utilizando un motor principal que accione los pernos de la cerradura, de manera de evitar el uso de electroimanes. Es decir, existen varias alternativas para modificar hasta lograr un funcionamiento pleno del conjunto, pero la base ya está hecha, y es justamente para lo que sirve un prototipo.

- Otro inconveniente es que en el caso de falla de alguno de los tres solenoides, no es posible realizar la apertura o cierre de la cerradura. Para este caso se contempla la utilización de una llave especial, la cual primero accionaría el émbolo del solenoide de traba, destrabando el mecanismo, y luego empujaría los pernos hacia dentro de la cerradura. Esta se considera la alternativa más viable, de forma de lograr la apertura de la puerta para realizar el intercambio de la cerradura sin tener que romper ningún elemento.
- El costo del producto es aceptable, por lo que es posible su implementación.

## Bibliografía

Parte Software:

Se utilizó bibliografía para programación en C++ y programación de PIC principalmente.

Barra Zapata, O. E.; Barra Zapata, F. Microcontroladores PIC con programación PBP.

México: Alfaomega, 2011

Microchip Technology Inc. (2007). Pic 16F627A/628A/648A Datasheet. Recuperado de <http://web.mit.edu/6.115/www/document/16f628.pdf>

Parte Electrónica:

Smith, M. J. Application-specific integrates circuits. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1997

Andreu, Oscar Aragón (2009). Lector de etiquetas pasivas de RFID. (Tesis de grado, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España). Recuperado de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1176pub.pdf>

Building a RFID reader (s. f.). Recuperado de <http://memweb.newsguy.com/~rhuang/RFID/rfid.html>

Ross, Craig & Goto, Ricardo (2006). Proximity Security System. Recuperado de <https://courses.cit.cornell.edu/ee476/FinalProjects/s2006/cjr37/Website/index.htm>

Microchip Technology Inc. (2004). Micro ID 125kHz RFID System Design Guide . Recuperado de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51115F.pdf>

Priority 1 Design (2007). EM4100 Protocol Description. Recuperado de [http://www.priority1design.com.au/em4100\\_protocol.html](http://www.priority1design.com.au/em4100_protocol.html)

Parte Mecánica: Shigley, J. E. Diseño en Ingeniería Mecánica. McGraw Hill, 1989

Serrano, A. El diseño mecánico. Mira Editores, 1999

Solenoid Technical Information (s. f.). Recuperado de <http://www.deltrol-controls.com/sites/default/files/brochures/Solenoid%20Tech%20Info.pdf>

Bicron Electronics Company. DC Solenoids, Technical Guide & Specifications. Recuperado de [http://www.bicronusa.com/pdfs/BICRON\\_DC\\_Solenoids.pdf](http://www.bicronusa.com/pdfs/BICRON_DC_Solenoids.pdf)