



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

NÉSTOR DE JUAN VÁZQUEZ

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**DISEÑO DE DISPOSITIVO DETECTOR
DE GASES EN ELECTRÓNICA FLEXIBLE
PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN
INDIVIDUAL**

JUNIO DE 2017

DATOS

Nombre del autor: Néstor

Apellidos del autor: de Juan Vázquez

DNI del autor: 32717111W

Nombre de la empresa: Fundación PRODINTEC

Nombre del tutor: Rafael Corsino González de los Reyes

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	7
1.2	REQUISITOS FUNCIONALES	7
1.3	OBJETIVOS A CUMPLIR DEL PROYECTO	8
2	ESTADO DEL ARTE	8
2.1	DETECCIÓN DE GASES EN EPIS	8
2.2	TECNOLOGÍA PONIBLE	9
2.3	ELECTRÓNICA FLEXIBLE	10
2.3.1.	DEFINICIÓN E HISTORIA	10
2.3.2.	MÉTODOS DE IMPRESIÓN FLEXIBLE	12
3	DISEÑO DEL SISTEMA	15
3.1	DISEÑO HARDWARE.....	15
3.1.1.	DISEÑO INICIAL DEL CIRCUITO.....	15
3.1.2.	ELECCIÓN DE COMPONENTES.....	17
3.1.3.	ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA	20
3.1.4.	ESQUEMA DEL CIRCUITO	21
3.2	DISEÑO DEL PROGRAMA DE CONTROL	23
3.2.1.	DISEÑO DEL STATE CHART.....	23
3.2.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA	27
3.3	DISEÑO DE LAS COMUNICACIONES.....	28
3.3.1.	COMUNICACIÓN SERIE	28
3.3.2.	COMUNICACIÓN BLUETOOTH.....	29
3.4	IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	31
3.5	CÁLCULO DE LA BATERÍA.....	32
3.6	DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO	33
4	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	35

4.1	IMPRESIÓN EN FORMA FLEXIBLE	35
4.1.1.	IMPRESIÓN MEDIANTE INKJET	35
4.1.2.	IMPRESIÓN MEDIANTE SERIGRAFÍA	37
4.2	COLOCACIÓN DE COMPONENTES	40
4.3	AUMENTO DE RIGIDEZ DE LA PLACA	42
5	RESULTADOS	44
5.1	MÉTODOS DE IMPRESIÓN	44
5.2	PRUEBAS Y EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO	45
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
7.1	DISEÑO DEL CIRCUITO	47
7.2	DISEÑO DEL PROGRAMA	48
7.3	IMPRESIÓN EN FORMA FLEXIBLE	48
7.4	PRUEBAS DEL DISPOSITIVO	49
7	CONCLUSIONES	50
8	DOCUMENTOS DEL PROYECTO	51
9	REFERENCIAS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplos de medidores estacionarios (izqda.) y portátiles (dcha.)	9
Figura 2: Ejemplo de gafas wearable [5]	10
Figura 3: Ejemplos de electrónica flexible	11
Figura 4: Aplicaciones de la electrónica impresa [9]	12
Figura 5: Funcionamiento de tecnología y equipo en funcionamiento.....	13
Figura 6: Diagrama funcional y ejemplo de dispositivo de serigrafía.....	14
Figura 7: Método de huecograbado en funcionamiento	14
Figura 8: Diseño en bloques del circuito a implementar.....	16
Figura 9: Sensor de gases MQ-135	18
Figura 10: LED RGB WS2812B empleado.....	19
Figura 11: Módulo de comunicación Bluetooth AMB2300.....	19
Figura 12: Diseño esquemático del dispositivo	22
Figura 13: State Chart diseñado.....	23
Figura 14: Superestado "LECTURA"	24
Figura 15: Superestado "ENVIO"	25
Figura 16: Superestado "LED"	26
Figura 17: State Chart implementado en la práctica	26
Figura 18: Modelo de comunicación UART entre dos dispositivos.....	29
Figura 19: Diagrama de secuencia de la comunicación implementada.....	30
Figura 20: Placa Arduino UNO empleada	31
Figura 21: Imagen del prototipo montado.....	32
Figura 22: Placa de circuito impreso desarrollada.....	34
Figura 23: Impresora Dimatrix de Fujifilm.....	35
Figura 24: Muestra recién impresa.....	36
Figura 25: Muestra tras superar el proceso de curado.....	37
Figura 26: Modificaciones del diseño	38
Figura 27: Pantalla de serigrafía con el dibujo del circuito	39
Figura 28: Muestra impresa mediante serigrafía plana	40
Figura 29: Fotografía del robot para Pick & Place.....	41
Figura 30: Cama caliente MK2a empleada en funcionamiento	41
Figura 31: Placa con la mayoría de los componentes adheridos	42
Figura 32: Muestras recortadas de metacrilato	43

Figura 33: Zoom de una de las muestras realizada con ink-jet	44
Figura 34: Zoom de una de las muestras realizadas con serigrafía	45
Figura 35: Dispositivo diseñado en funcionamiento	46

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto descrito se centra en el diseño, implementación y realización de pruebas de un sistema para detección de gases nocivos desarrollado de tal forma que posteriormente pueda ser incluido con facilidad en prendas de vestir y equipos de protección individual, dando lugar a objetos con tecnología ponible o wearables.

Para ello, se recurrirá al concepto de electrónica flexible y se diseñará un dispositivo acorde a este método de fabricación, tal que pueda ser aplicado posteriormente en equipos de protección individual como cascos o chalecos, facilitando al operario el conocimiento de su entorno y avisándolo de una situación de peligro de forma visual y sin tener que cargar por ello con dispositivos incómodos o pesados.

1.2 REQUISITOS FUNCIONALES

Dado lo descrito en el punto anterior, el sistema deberá cumplir con las siguientes funcionalidades:

- Todo el sistema será implementado sobre sustrato flexible, buscando componentes y materiales adecuados para la realización del dispositivo mediante este método.
- Debido a sus características de wearable o ponible, el dispositivo será alimentado mediante el empleo de una batería que lo acompañará en aquel EPI sobre el que se instale.
- En función de la concentración detectada del gas, una matriz de LEDs RGB de 3x3 se iluminará en un color u otro (verde y rojo) para indicar al usuario si corre o no peligro.
- La matriz mencionada dibujará una letra identificativa del gas que está siendo detectado.

- El sistema deberá ser capaz de enviar mediante una comunicación Bluetooth el nivel de concentración que se haya detectado de forma constante.

1.3 OBJETIVOS A CUMPLIR DEL PROYECTO

El objetivo final del proyecto será, atendiendo a los requisitos funcionales mencionados en el subapartado interior, el diseño y construcción de un dispositivo wearable que pueda realizar las tareas mencionadas.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 DETECCIÓN DE GASES EN EPIS

La detección de gases perjudiciales está ampliamente implementada en el ámbito industrial. Debido a la necesidad de proteger tanto a los operarios como a las instalaciones de las posibles consecuencias (enfermedades, explosiones,...), es de importancia vigilar la presencia de determinados gases en el ambiente de trabajo.

Estos dispositivos se presentan tanto de forma rígida, instalados en puntos estudiados para captar las mejores lecturas, como de forma portátil, que suelen ser cada vez más comunes frente a los anteriores debido a que permiten al operario conocer en todo momento la concentración de uno o varios gases peligrosos a su alrededor. Los dispositivos de instalación fija quedan relegados a su emplazamiento en determinadas estancias donde sea necesario controlar los niveles de estas sustancias en varios puntos.



Figura 1: Ejemplos de medidores estacionarios (izqda.) y portátiles (dcha.)

Los métodos empleados para la detección de gases tecnológicamente hablando, varían en función del dispositivo. Existen en el mercado desde sistemas de detección de presencia de un determinado gas mediante infrarrojos [1] o procedimientos ópticos [2], hasta sistemas que combinan el empleo de compuestos químicos específicos conectados a electrodos tal que proporcionen señales eléctricas acordes a la concentración de dichos gases [3]. Estos métodos deben, además, cumplir con legislaciones cada vez más exigentes en lo relativo a dotar de funcionalidades electrónicas a equipos de protección individual [4].

En lo referente a sus características físicas, los dispositivos portátiles son en general engorrosos para su transporte debido a su volumen o su peso. Por ello, sería de interés desarrollar equipos con tecnologías que los hagan más ligeros y manejables, sin comprometer sus funcionalidades.

2.2 TECNOLOGÍA PONIBLE

El concepto de tecnología ponible o vestible (en inglés *wearable technology*) como desarrollo de objetos y prendas de vestir inteligentes surge en los años 90 de una forma primitiva con el comienzo de desarrollo de electrónica portable y de tamaño reducido [5]. A pesar de no ser dispositivos que triunfasen comercialmente y estuviesen más centrados en la investigación, sentaron las bases del concepto. En el año 1996, la agencia de defensa estadounidense

(DARPA) consolidó el término *wearable* por primera vez, confiriendo oficialidad a este tipo de tecnología.

No sería hasta mediados de la década de los 2000 cuando gracias a los avances en el campo de la electrónica se desarrollarían los primeros dispositivos funcionales y comercializables, como cámaras ideadas para ser incorporadas en la ropa o el cuerpo, o zapatillas inteligentes que transferirían datos de interés a móviles u otros dispositivos.



Figura 2: Ejemplo de gafas wearable [5]

Con el paso de los años, a medida que la electrónica fue avanzando en los campos de la portabilidad, consumo o comunicaciones, se han ido desarrollando dispositivos cada vez más complejos y a la vez cómodos de integrar en nuestro día a día en forma de complementos o prendas de vestir [6].

2.3 ELECTRÓNICA FLEXIBLE

2.3.1. DEFINICIÓN E HISTORIA

La electrónica impresa o flexible es una tecnología innovadora que permite producir dispositivos y circuitos electrónicos mediante procesos de impresión convencional (offset, flexografía, huecograbado, inkjet o serigrafía) sobre cualquier tipo de superficie, rígida o flexible, y de gran área. Además de la flexibilidad, esta tecnología se caracteriza por su ligereza, bajos costes de

producción, fiabilidad o robustez [7]. Básicamente, puede decirse que con la Electrónica Impresa se forma un componente electrónico por las interacciones que se generan con la deposición de diferentes capas de tinta conductoras o semi-conductoras.

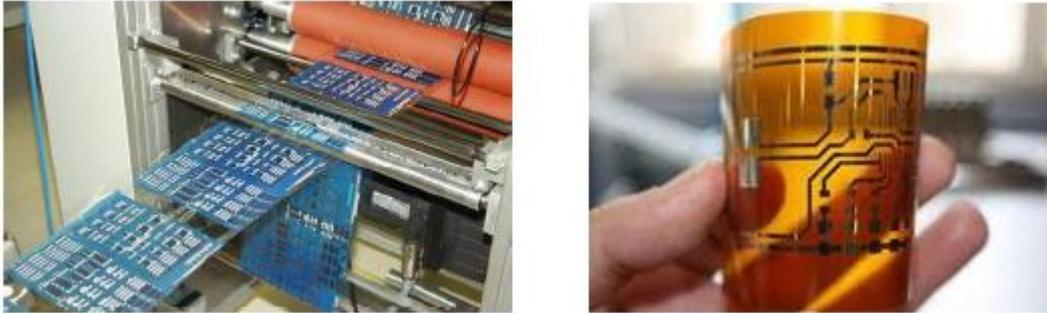


Figura 3: Ejemplos de electrónica flexible

Los primeros avances en el campo de la electrónica flexible datan de los años 60 con el desarrollo de los primeros prototipos de células solares [8]. Los posteriores avances en técnicas de fabricación y descubrimientos en propiedades de materiales harían que a mediados de los 90 se comenzasen a desarrollar los primeros circuitos flexibles empleando TFTs.

En los últimos años y gracias al estudio y desarrollo de nuevos materiales la electrónica impresa ya no es solo una tecnología experimental. A día de hoy ya se puede considerar una realidad que abre múltiples posibilidades y que tiene un gran potencial, ya que permite otorgar nuevas funcionalidades y propiedades diferenciales a muchos productos que ya se encuentran en el mercado. Entre estas características hay que mencionar: la flexibilidad, la facilidad de integración, la capacidad para adaptarse a entornos muy diferentes, el coste o la escalabilidad a grandes formatos. Todas estas características, hacen que la electrónica impresa tenga el potencial necesario para convertirse en una tecnología innovadora en un gran número de aplicaciones. Se espera que el desarrollo de esta técnica permita imprimir elementos como resistencias, condensadores, bobinas, transistores y todos los componentes electrónicos presentes en los circuitos convencionales sobre soportes muy diversos, como tejidos o plásticos.

Comienzan a aparecer así los primeros productos que hacen uso de esta tecnología incipiente, como por ejemplo: sensores táctiles en superficies de muebles, paneles OLED de flexibilidad total [7], instalaciones de iluminación eficiente en grandes superficies, celdas fotovoltaicas de bajo coste, baterías más respetuosas con el medio ambiente o creación de tejidos inteligentes, entre otras. En la siguiente Figura 2 se muestran las principales aplicaciones previstas de la electrónica impresa.

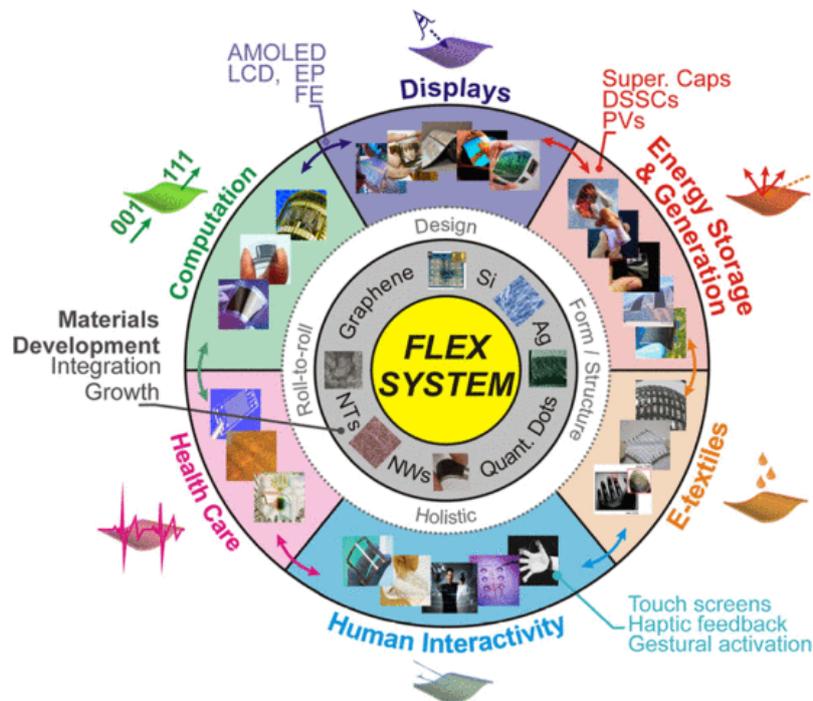


Figura 4: Aplicaciones de la electrónica impresa [9]

2.3.2. MÉTODOS DE IMPRESIÓN FLEXIBLE

El crecimiento que está sufriendo la electrónica impresa facilita que cada vez se investiguen más métodos para poder realizarla, permitiendo obtener procesos y máquinas cada vez más eficaces, baratos y optimizados [6].

Dentro de estos métodos se destacan los siguientes, los cuales pueden ser desarrollados en la empresa:

- Ink-jet: la impresión ink-jet se basa en la eyección controlada digitalmente de gotas de tinta desde un cabezal de impresión hasta un sustrato. La mayoría de las impresoras ink-jet utilizadas hoy en día se basan en tecnología drop-on-demand (DOD), en la que las gotas se liberan a demanda según el patrón a imprimir. La generación de gotas se produce a partir de pulsos de presión producidos por cristales piezoeléctricos que sufren una distorsión al aplicar un campo eléctrico. La tecnología piezoeléctrica es la más utilizada a nivel industrial ya que permite el máximo grado de libertad para la elección de la tinta de impresión. Esta técnica ofrece como ventaja el no ser necesaria la inversión en ningún tipo de utillaje o molde previo. Como limitación, requiere tintas con formulaciones específicas no siempre disponibles ni económicas.

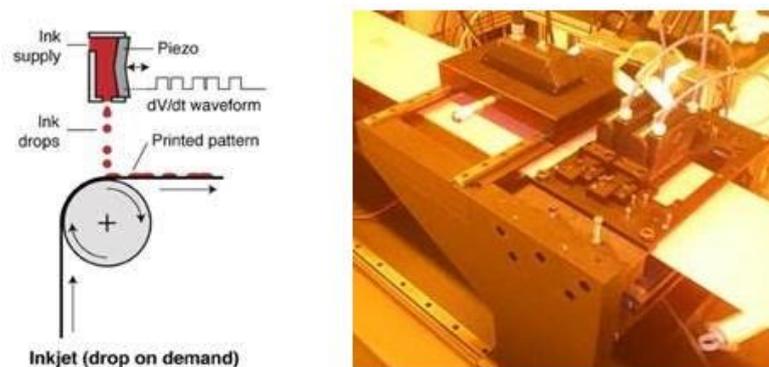


Figura 5: Funcionamiento de tecnología y equipo en funcionamiento

- Serigrafía: la impresión por serigrafía o screen-printing consiste en hacer atravesar la tinta a través de una pantalla tensada que permite el paso de la tinta sólo en las zonas en las que se requiere, según la imagen previamente impresa sobre la pantalla mediante una emulsión. Mediante esta tecnología es posible depositar electrodos con espesores de un mínimo de 300 μm . Como limitación se encuentra el alto precio de las pantallas empleadas y las dificultades asociadas a su proceso de limpieza.

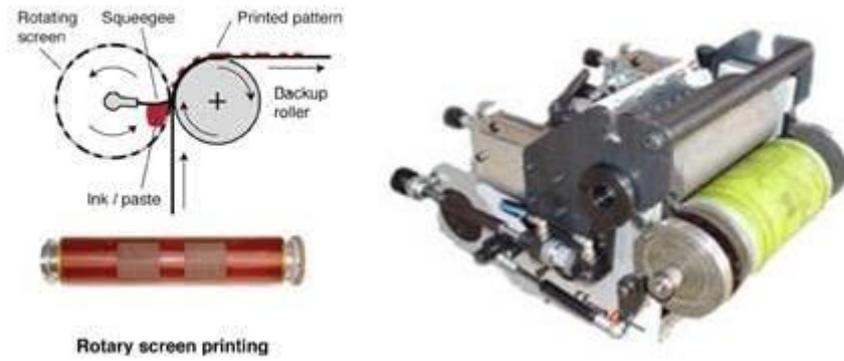


Figura 6: Diagrama funcional y ejemplo de dispositivo de serigrafía

- Huecograbado: la impresión por huecograbado es otra técnica de impresión rotativa en la que el motivo a imprimir se transfiere desde un cilindro de impresión hasta el sustrato. El motivo se define mediante pequeñas cavidades grabadas en el cilindro de impresión que constantemente se rellenan a su paso por un baño de tinta, siendo el exceso de tinta retirado por una cuchilla denominada *doctor blade*. La dimensión de las cavidades determina el espesor de las pistas impresas. Es una tecnología ampliamente utilizada en impresión de medios.

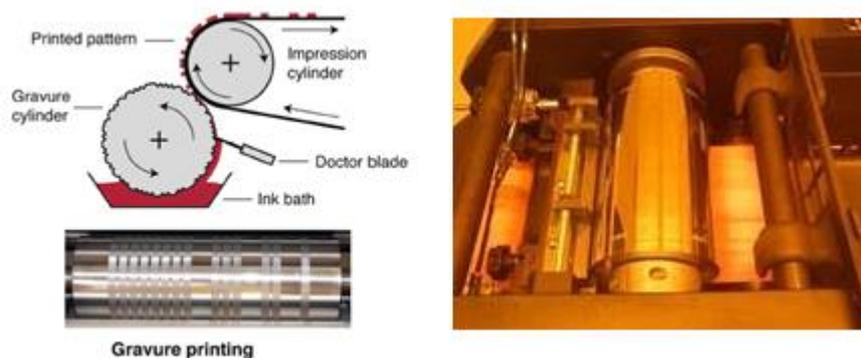


Figura 7: Método de huecograbado en funcionamiento

3 DISEÑO DEL SISTEMA

En este apartado se definirán en detalle los pasos del procedimiento que se seguirá para el diseño del sistema mencionado, tanto desde el punto de vista hardware como software.

Así, para poder cumplir con los objetivos descritos se ejecutará el diseño en el siguiente orden:

- Estudio de opciones de diseño del circuito físico según especificaciones.
- Diseño del programa de control.
- Diseño del circuito en forma impresa.

3.1 DISEÑO HARDWARE

Inicialmente se diseñará el circuito eléctrico del que se partirá para desarrollar todo lo posterior. Se seguirán las especificaciones dadas en el apartado 1.2 y el proceso se dividirá en los apartados mencionados a continuación.

3.1.1. DISEÑO INICIAL DEL CIRCUITO

Se diseñará de forma esquemática un primer circuito prototipo que permita dar forma a lo que será el dispositivo final, teniendo en consideración los requisitos funcionales especificados.

De esta forma, en la siguiente figura se puede observar dicho esquema. El circuito consta de una serie de elementos que han sido encapsulados en forma de bloques para facilitar la comprensión del funcionamiento del sistema.

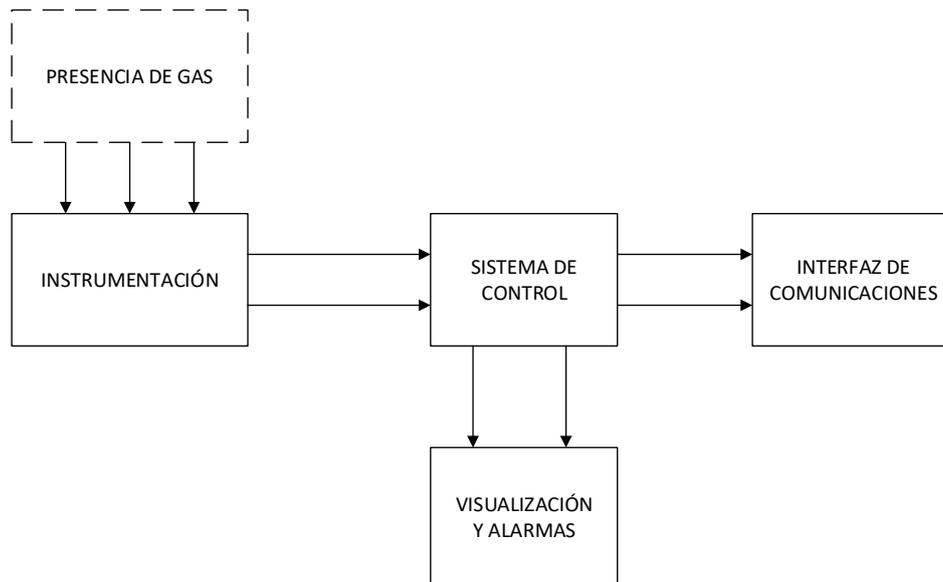


Figura 8: Diseño en bloques del circuito a implementar

A continuación se definen los bloques mostrados:

- Instrumentación: representa los dispositivos que se encargarán de recoger muestras de la concentración del gas o gases detectados y acondicionar las medidas para poder trabajar con ellas a nivel eléctrico. Según los requisitos funcionales, este bloque constará fundamentalmente de sensores que sean capaces de llevar a cabo la tarea descrita para posteriormente proporcionar dicha información al sistema de control empleado.
- Sistema de control: será el encargado de la lógica de control del sistema, actuando de diversas formas en función de las señales procedentes de la instrumentación.

Dentro de las alternativas existentes en el mercado para desempeñar esta función, se ha decidido escoger un microcontrolador, por ser un dispositivo fácil de programar y por estar más que capacitado para desarrollar una tarea como la descrita en este proyecto.

- Interfaz de comunicaciones: permitirá enviar la señal de concentración obtenida del controlador a cualquier dispositivo que tenga el mismo protocolo de comunicación.

Como por requisitos esta tarea será llevada a cabo mediante protocolo Bluetooth, se elegirá un módulo de comunicaciones específico para este tipo de comunicaciones.

- Visualización y alarmas: se encargará de avisar al operario o usuario del dispositivo diseñado (en este caso, de forma visual) de un valor excesivo de concentración del gas a través del controlador empleado. Por requisitos funcionales esta tarea se realizará mediante una matriz de LEDs RGB.

3.1.2. ELECCIÓN DE COMPONENTES

Será necesario previo paso al diseño del prototipo la elección de los componentes a emplear. Al no existir ningún requisito eléctrico del sistema los valores de alimentación se elegirán en función de los dispositivos más importantes de la placa, a saber:

- Sistema de control (microcontrolador): debido a que la aplicación para que se le destinará no implica un programa de control complejo, bastaría escoger un microcontrolador sencillo sin ser necesario que disponga de un gran número de E/S analógicas y/o digitales.

Atendiendo a esto, se ha escogido como controlador un ATmega328P [10], conocido por ser ampliamente empleado en placas de desarrollo Arduino de 8 bits y bajo coste. El hecho de poder adquirir la placa junto al micro facilita y acelera considerablemente la realización del prototipo al poder probar con facilidad el programa de control.

- Instrumentación: el elemento de mayor relevancia en este grupo es el sensor de gases. Para su elección se tiene en cuenta que su precisión no necesita ser muy elevada al ser el dispositivo más una prueba para posteriores estudios y mejoras que para su implementación inmediata en un EPI.

Teniendo en cuenta esto se ha escogido un sensor modelo MQ135, perteneciente a la familia de sensores de gases MQ [11]. Permite detección de señal tanto digital como analógica y su tensión de alimentación es de $5 \pm 0.1V$.

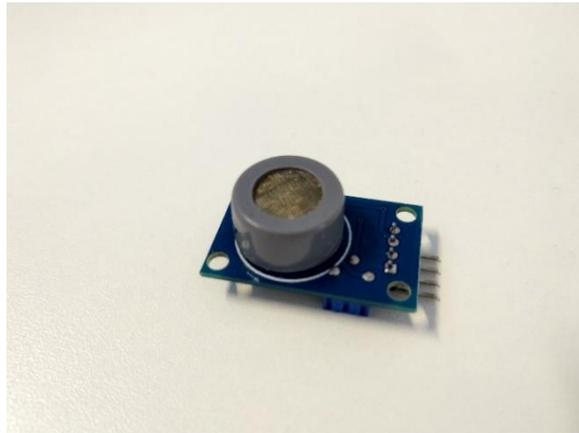


Figura 9: Sensor de gases MQ-135

Dicho sensor necesita ser calibrado para un determinado gas según las curvas proporcionadas para el fabricante. La calibración realizada se puede ver en detalle en el anexo Cálculos.

- Iluminación: debido a que en las especificaciones del diseño se establece la capacidad de modificar el color en función de la concentración detectada, se emplearán LEDs RGB por suponer la forma más sencilla de realizar esta tarea sin influir en exceso en las necesidades de construir una placa lo más pequeña posible.

Dentro de los disponibles en el mercado se han escogido modelos WS2812B [12]. Permiten gran versatilidad al poder ser modificado su estado de forma independiente unos de otros compartiendo el mismo bus de datos, y su voltaje de alimentación puede llegar hasta los 7.0V.

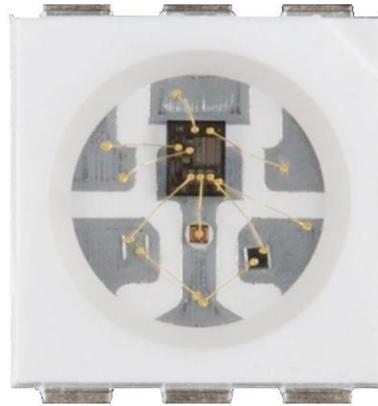


Figura 10: LED RGB WS2812B empleado

- Módulo de comunicaciones (Bluetooth): es necesario para permitir al sistema comunicarse mediante este protocolo inalámbrico con otros dispositivos que así se deseen. No se precisan unas características para el mismo determinadas, por lo que se ha decidido escoger un módulo pensado para ser configurado por hardware en vez de por software para hacer el programa de control más sencillo.

Partiendo de lo dicho, el modelo escogido es el AMB2300 [13] de la marca Amber Electronics. Permite comunicación por UART y su tensión de alimentación se mueve entre márgenes de 2.9 y 3.6V.



Figura 11: Módulo de comunicación Bluetooth AMB2300

3.1.3. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

Definidos los componentes, las tensiones de alimentación asociadas a estos se recogen en la siguiente tabla, en base a lo definido en sus respectivas hojas de características:

Componente	Tensión mínima (V)	Tensión máxima (V)
Microcontrolador	1.8	5.5
Sensor	4.9	5.1
LEDs	$0.7V_{DD}^*$	7.0
Módulo Bluetooth	2.9	3.6

Tabla 1: Tensiones de alimentación de los componentes

***Su tensión mínima deberá ser 0.7 veces la tensión a la que se alimente por la caída en el diodo, siempre que esté por debajo de la máxima.**

Atendiendo a todo lo mencionado, la señal de alimentación empleada para el sistema será de 5V debido a que es la más compatible con los componentes. Debido a esto, se deberá escoger comercialmente una batería superior a este valor, al no existir de este nivel en concreto. Teniendo en cuenta los valores de alimentación eléctrica descritos, la elección es de una batería de litio de 7.4V, por lo que será necesario también añadir al circuito una etapa de conversión de tensión a un valor de 5V estable. El valor del voltaje proporcionado por la batería podría ser mayor a ese valor, siempre que no superase el máximo de tensión de entrada del regulador que se escoja, al ser el componente que sufriría dicha tensión inicial.

Además de lo anterior, al tener el módulo Bluetooth un valor de alimentación distinto al resto del conjunto, se empleará para la alimentación del módulo un convertidor DC-DC para obtener 3.3V estables. Para las señales de comunicación puerto serie que se mencionarán más adelante, las cuales comunican microcontrolador y módulo, se emplearán divisores de tensión simples, sin necesitar de resistencias de precisión debido a las especificaciones

de niveles de tensión alto y bajo. Como convertidores, se emplearán un regulador MIC5205 para la obtención de los 5V y un controlador Buck LM3670 para la generación de los 3.3V.

Se ha valorado también la alternativa a este sistema de alimentación empleando un convertidor Boost directamente con una batería de menor voltaje. Sin embargo, se dan dos situaciones en el diseño que ponen esta alternativa por debajo de la principal mencionada (regulador + Buck):

- No existe una batería de Litio comercial que funcione a 3.3V directamente. Aunque la diferencia de voltaje respecto a lo disponible comercialmente (3.7V) no es elevada, no resulta ser tan preciso como el método diseñado, además de que el módulo Bluetooth, componente que se alimentaría con esta tensión, estaría trabajando por encima de su valor máximo.
- El regulador y el convertidor reductor elegidos tienen buenos valores de eficiencia, con pérdidas de corriente muy pequeñas (en el caso del regulador menos de 1 mA [14] y en el caso del convertidor 15 μ A con una eficiencia de casi el 94% [15]).

Todas las características de los componentes empleados se mencionan en detalle en los datasheets adjuntos a este documento. Todos los cálculos pertinentes que hayan sido necesarios se mencionan en el anexo Cálculos.

3.1.4. ESQUEMA DEL CIRCUITO

Tras definir los componentes, se ha creado un esquemático de lo que sería el prototipo del dispositivo a diseñar empleando el software Eagle de diseño de circuitos y PCBs. El esquemático del circuito puede verse a continuación, mostrándose también en mayor detalle en el anexo Planos.

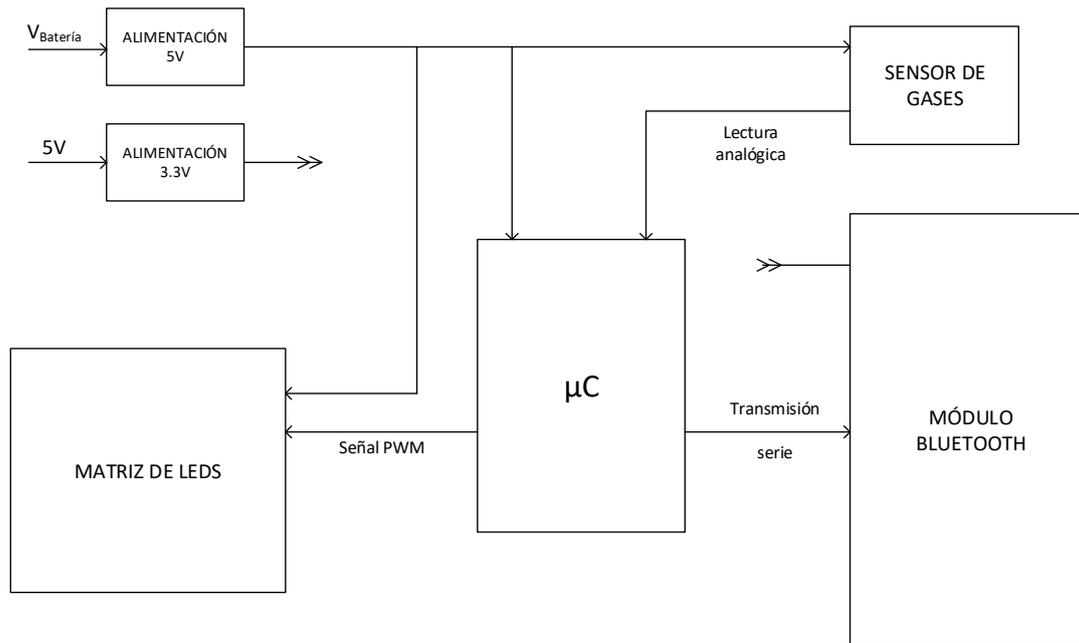


Figura 12: Diseño esquemático del dispositivo

A través del anexo mencionado pueden observarse los diversos elementos mencionados anteriormente interconectados entre sí. Se han añadido todos los componentes pasivos necesarios (condensadores, resistencias, oscilador,...) atendiendo a las hojas de características de los componentes del dispositivo. Los cálculos de posibles capacidades, resistencias u otras características de componentes se encuentran reflejados en el anexo Cálculos.

Los LEDs han sido dispuestos en forma de matriz como se especificaba en los requisitos de diseño, con la ventaja de que únicamente se necesita una señal de control para gobernarlos a todos de forma independiente, lo que ha evitado la necesidad de usar pines adicionales del microcontrolador y aumentar el consumo del circuito.

Se incluirán divisores de tensión, como se mencionaba en el apartado anterior, para determinadas señales entre el micro y el módulo Bluetooth (TX, Reset) con el objetivo de adecuar los niveles de tensión de las señales de salida del primero a los niveles de trabajo del segundo (no es necesario recibir señal del módulo por lo que no será conectada). Los valores de las resistencias de los divisores están dimensionados en el anexo Cálculos.

3.2 DISEÑO DEL PROGRAMA DE CONTROL

A la par que se ha realizado el diseño del circuito eléctrico, se ha desarrollado un programa de control para el dispositivo que posteriormente se cargará en el μC empleado.

Este apartado puede dividirse a su vez en dos: el diseño conceptual del programa mediante el modelado de un State Chart; y su implementación en código y carga en el microcontrolador en la plataforma Arduino.

3.2.1. DISEÑO DEL STATE CHART

El diseño inicial del programa mediante State Chart permitirá comprobar si el programa final cumplirá con todas las funcionalidades exigidas anteriormente. Ha sido realizado empleando el software Simulink. El diseño final se muestra en la siguiente imagen.

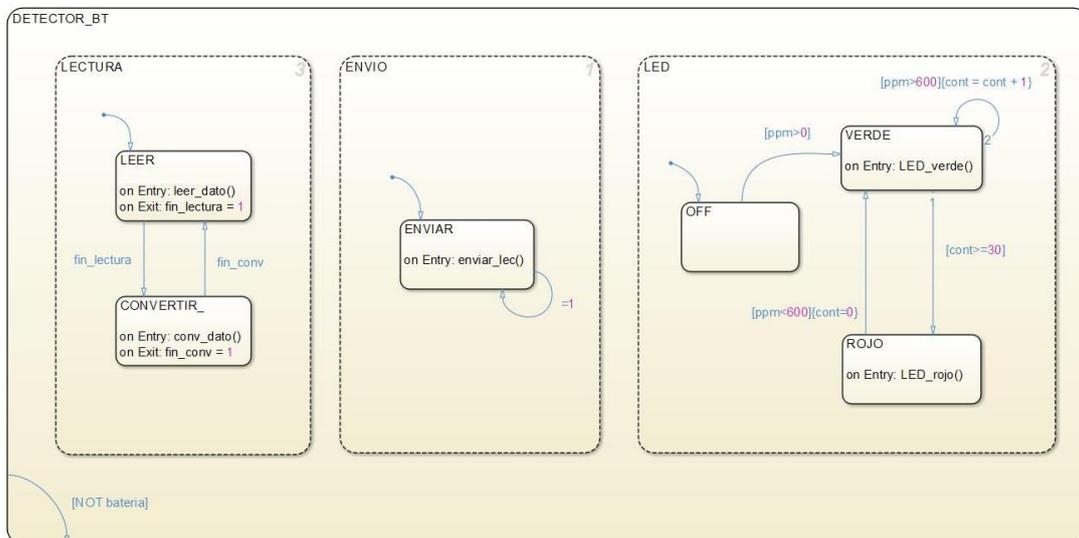


Figura 13: State Chart diseñado

La disposición del State Chart se mueve alrededor de un superestado general (DETECTOR BT), que a su vez estará compuesto por tres superestados en ejecución simultánea (AND):

- LECTURA: el sistema se encarga de leer la señal eléctrica y acondicionada enviada por el sensor al microcontrolador en el primer estado (LEER) y una vez hecho esto lo convierte mediante varias operaciones matemáticas a un valor de concentración interpretable en partes por millón en el segundo estado (CONVERTIR).

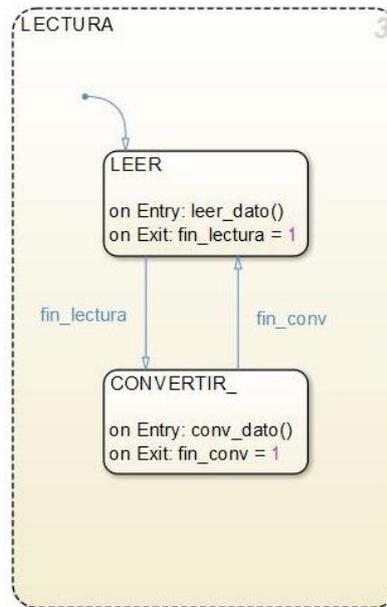


Figura 14: Superestado "LECTURA"

- ENVÍO: posee un único estado (estado hoja) en el cual se produce el envío de la concentración (ENVIAR). No necesita de más estados porque a priori no se exige por diseño conocer que el dato ha llegado correctamente al receptor.

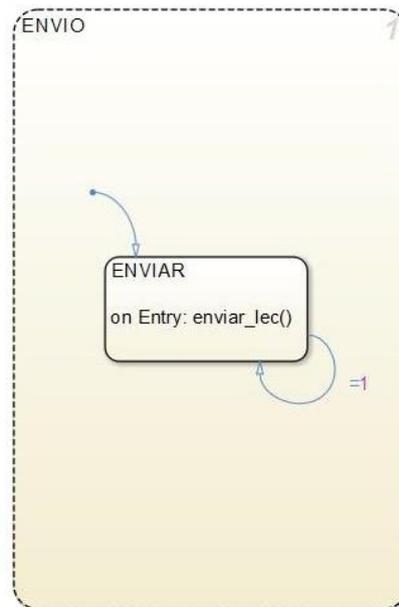


Figura 15: Superestado "ENVIO"

- LED: al presentarse en dos colores distintos, este superestado presentará dos estados: VERDE, en el cual los LEDs se encenderán de este color; y ROJO, en el cual los LEDs harán lo correspondiente para iluminarse así. La evolución entre ambos estados estará controlada por el nivel de concentración del gas medido, siendo verde si está por debajo del nivel de peligro y rojo si es lo contrario. Para evitar falsos positivos, se ha incluido un contador en el estado VERDE que tendrá en cuenta que las medidas peligrosas de concentración se mantengan en el tiempo lo suficiente para considerarse veraces.

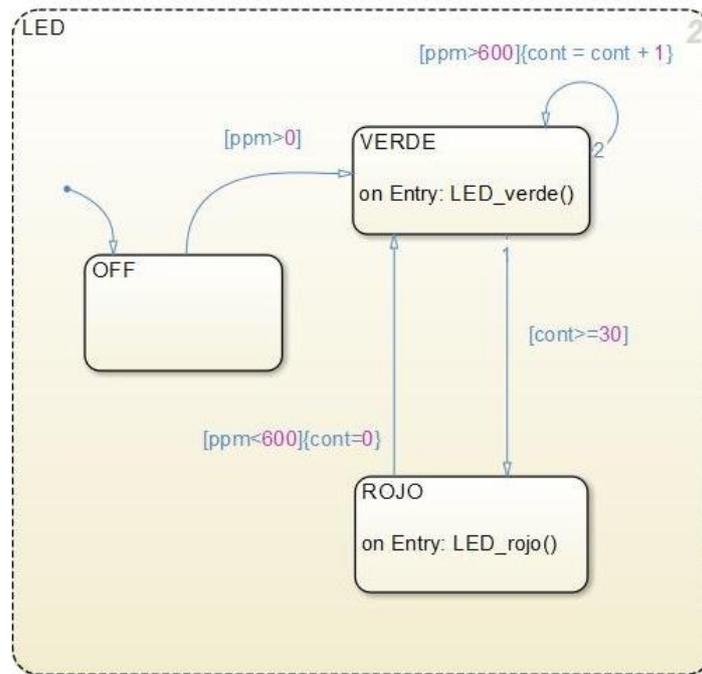


Figura 16: Superestado "LED"

De esta forma, la idea que el programa final deberá implementar es la de realizar las tres funciones que le corresponden (lectura de la señal, envío de datos al módulo Bluetooth y control de los LEDs) en ejecución concurrente.

Sin embargo, sólo existe simultaneidad en caso de procesamiento paralelo (lo que podría realizarse con un procesador multinúcleo). En cualquier otro caso, el planificador se encargará de dedicar un determinado tiempo a cada tarea de tal forma que ésta se ejecute, obteniendo un flujograma de programa como el mostrado en la siguiente figura.

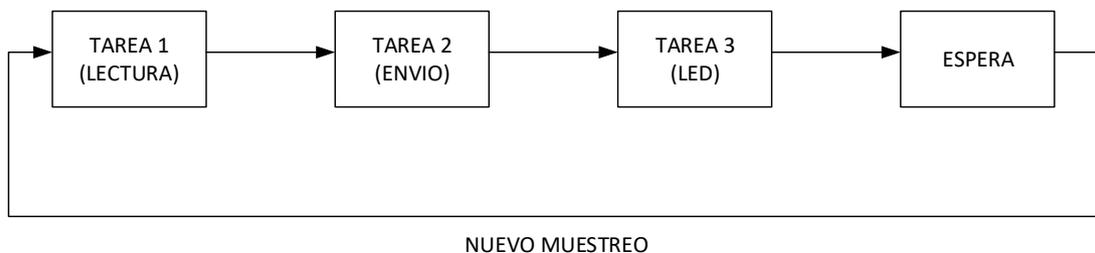


Figura 17: State Chart implementado en la práctica

Como puede observarse, la ejecución de los superestados internos no se realiza de forma paralela (ejecución AND), sino que sigue un proceso secuencial en el cual cada superestado ejecuta un estado interno y evoluciona al siguiente antes de saltar a un nuevo superestado.

3.2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA

Una vez realizado el State Chart, el programa ha sido implementado en base a éste empleando el IDE propio de Arduino en su lenguaje de programación, que supone una modificación del C plano.

Para facilitar el diseño del programa, inicialmente se programaron las tareas principales representadas en el State Chart de forma separada, juntando estos módulos posteriormente en lo que sería el programa final.

Para el desarrollo ha sido necesario recurrir al empleo de librerías externas:

- SM: librería necesaria para la programación de la máquina de estados desde Arduino. Proporciona todos los mecanismos necesarios para implementar las mecánicas características de ésta, como estados o transiciones, así como la concurrencia AND entre los tres superestados principales [16].

Así, la implementación del State Chart diseñado más arriba se ha seguido según el propio modelo de ejemplo proporcionado por la librería empleada.

- Adafruit_NeoPixel: librería oficial empleada para el control del modelo de LEDs RGB empleado [17], facilitando su manipulación desde código sin necesidad de profundizar en niveles más bajos de programación.

Todo el código diseñado se encuentra detallado en el anexo Código Fuente.

3.3 DISEÑO DE LAS COMUNICACIONES

La presencia del módulo Bluetooth en el dispositivo obliga a establecer una comunicación entre éste y el microcontrolador, además de entre el primero y cualquier otro dispositivo con dicho protocolo de comunicación. Ambos problemas se abordan a continuación.

3.3.1. COMUNICACIÓN SERIE

El sistema deberá ser capaz de comunicarse mediante tecnología Bluetooth con aquellos dispositivos que quieran conectarse a él para poder leer la concentración del gas si así lo desean. Para aportar esta función al dispositivo se empleará el módulo AMB2300 mencionado en el apartado 3.1.1.

En el ámbito hardware, la comunicación entre el módulo y el microcontrolador se llevará a través de puertos serie (UART). Para hacerla posible será necesario conectar los pines RX y TX del microcontrolador empleado con los correspondientes TX y RX, respectivamente, del módulo Bluetooth, al ser las dos líneas empleadas para la transmisión y recepción de datos.

Debido a que el microcontrolador trabajará a 5V y el módulo a 3.3V, no habrá problemas eléctricos si se conectase directamente el pin TX del módulo BT con el correspondiente RX del μ C ya que el pin de éste último soportará valores de tensión iguales o menores a los de la alimentación. Para la conexión entre el TX del controlador y el RX del módulo sí será necesario adaptar el nivel de tensión, tal y como queda reflejado en detalle en el anexo Cálculos.

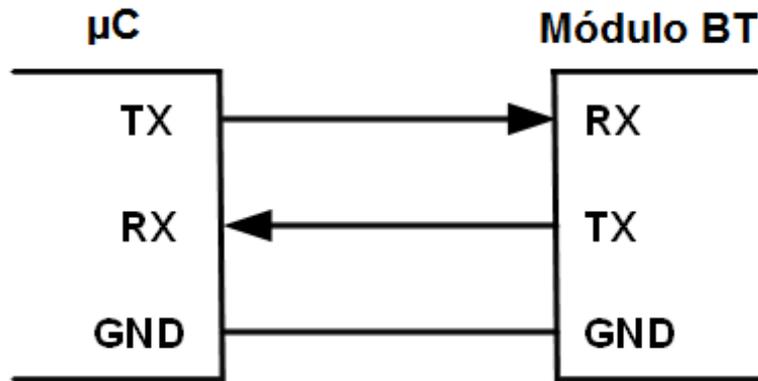


Figura 18: Modelo de comunicación UART entre dos dispositivos

Para el sistema diseñado, la comunicación se producirá únicamente en una sola dirección (del microcontrolador al módulo), ya que por especificaciones del diseño no se hace necesario que el micro reciba ningún tipo de acuse de recibo o instrucción. Los ajustes de la comunicación serie serán los predefinidos por el microcontrolador por ser más que suficientes para la comunicación a llevar a cabo y estar dentro de las posibilidades del módulo:

- Tasa de transferencia (Baud Rate): 9600 bps.
- Bit de Stop: Sí.
- Paridad: No.

3.3.2. COMUNICACIÓN BLUETOOTH

Por ser el Bluetooth un tipo de comunicación maestro-esclavo, es conveniente aclarar el papel del módulo y por ende del sistema cuando se empareje con otro dispositivo Bluetooth.

En este caso, el módulo Bluetooth integrado en el sistema actuará como esclavo en la comunicación, comportándose el otro dispositivo (teléfono móvil, ordenador,...) como dispositivo maestro. Esto implica que el sistema será un elemento pasivo tal que esperará a la comunicación del dispositivo maestro y a que éste le pida transmitir datos para que el primero actúe en consecuencia.

Dicho proceso se refleja de forma visual en el siguiente diagrama de secuencia. Cabe mencionar que las acciones iniciales de pedir emparejamiento y enviar contraseña son realizadas por el usuario del dispositivo maestro, momento a partir del cual la comunicación se realiza de forma automática entre los interlocutores sin necesidad de intervención de una persona.



Figura 19: Diagrama de secuencia de la comunicación implementada

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Tras los diseños iniciales del circuito y del programa de control así como de las comunicaciones empleadas, se ha implementado un prototipo para comprobar la funcionalidad del diseño y realizar correcciones en el mismo en caso de ser necesario.

Todos los componentes del prototipo son los mencionados más arriba, con una serie de aclaraciones:

- Como se mencionó con anterioridad, el microcontrolador empleado estará implementado en una placa Arduino UNO con la que se realizarán las pruebas. Permitiendo programar con facilidad el dispositivo a través de su IDE.
- Las etapas de alimentación del regulador y el convertidor no se han implementado de momento, dejándose para la placa final que se implemente. Esto es debido a que la placa de desarrollo de Arduino ya incluye salidas estables a 3.3 y 5V, facilitando la rapidez de montaje.

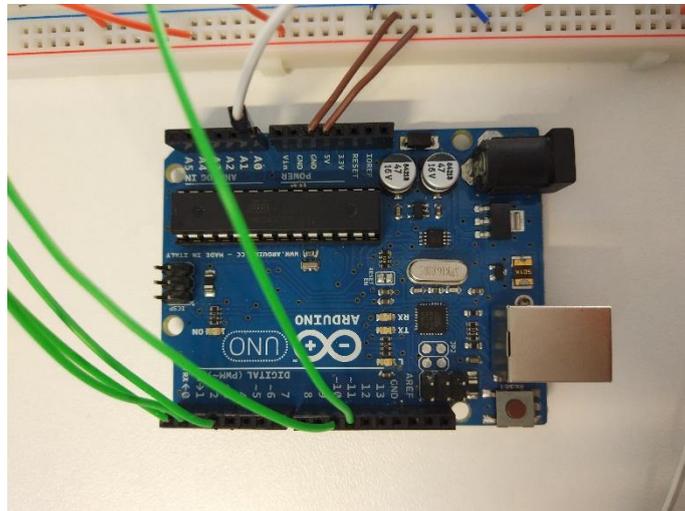


Figura 20: Placa Arduino UNO empleada

- Los LEDs empleados consistirán en una tira de LEDs ya realizada previamente por la empresa sobre sustrato flexible, agilizando el testeo del prototipo al reducirse el tiempo de implementación.

Siguiendo el esquema anteriormente mostrado y con las excepciones mencionadas, empleando una protoboard se han conexionado todos los elementos entre sí, dando lugar a algo como lo mostrado en la siguiente imagen.

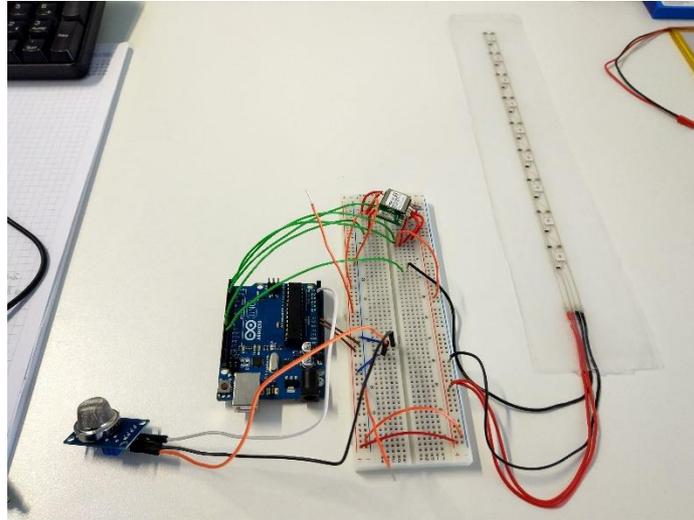


Figura 21: Imagen del prototipo montado

Para comprobar el funcionamiento de una forma más realista, se ha alimentado todo el sistema desde una fuente de alimentación que proporcione el valor de tensión de la batería comercial que se emplease una vez estuviese definitivamente implementado. Ello también permitirá calcular la duración de la misma atendiendo al consumo eléctrico del sistema.

3.5 CÁLCULO DE LA BATERÍA

Una vez alimentado el circuito, se ha medido la corriente para evaluar su consumo, con el objetivo de poder conocer cuánto tiempo aguantaría el dispositivo encendido en función de la batería escogida. El valor aproximado obtenido de corriente consumida queda recogido en la siguiente tabla; aunque cabe mencionar que dicho valor disminuiría al eliminar componentes innecesarios a la hora de implementar el circuito definitivo. La tabla siguiente recoge ambos casos:

Componente	Consumo en prototipo (mA)	Consumo final estimado (mA)
Microcontrolador	45	12*
Regulador	1.5	1.5
Convertidor DC-DC	0.75	0.75
Sensor	125	119**
LEDs	30	30
Módulo Bluetooth	14	14
TOTAL	230.5***	191.5***

Tabla 2: Consumos actual y final estimado del dispositivo

***El consumo se disminuye eliminando todos los componentes de la placa de desarrollo innecesarios.**

****Todos los componentes no necesarios (LED de funcionamiento, etapa de detección digital) son eliminados.**

*****En los consumos totales se incluyen también los generados en otros elementos “menores” del circuito, siendo la lectura total la obtenida en el polímetro empleado.**

Atendiendo a dichos consumos, se han realizado los pertinentes cálculos de la capacidad de la batería. Todos ellos se reflejan en el anexo Cálculos.

3.6 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO

Una vez implementado el prototipo y realizado las pruebas de funcionamiento se ha pasado a diseñar el circuito sobre placa impresa. Para su realización se ha empleado el software de diseño de PCBs Eagle.

Dados las características de precisión de los medios de impresión que se emplearán más adelante, así como los valores de corriente que estarán presentes en el circuito, se han escogido los anchos de pista y aislamientos adecuados a estas restricciones. El valor mínimo de ancho de pistas que se necesitará, calculado en detalle en el anexo Cálculos, será de un mínimo de 168 μm , y se buscará el ancho de aislamiento lo más elevado posible para facilitar un buen resultado en la posterior impresión.

En la siguiente imagen se muestra el diseño de la placa, el cual se encuentra en el anexo Planos en una escala mayor de visualización.

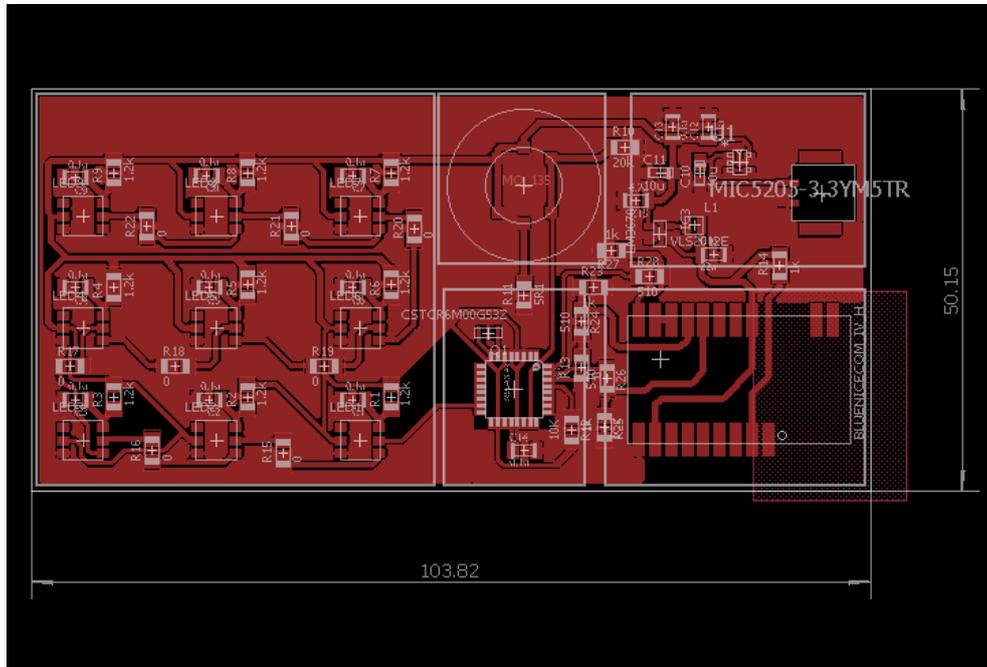


Figura 22: Placa de circuito impreso desarrollada

Tras finalizar el diseño, éste presenta las siguientes características que se consideran influyentes en el empleo de los métodos de impresión que se mencionarán en el siguiente punto:

- El espesor de pistas tiene un valor mínimo absoluto de 300um y un máximo de 800 um, siendo la mínima distancia de aislamiento del plano de masa entre componentes de más de 300um.
- Los tamaños mínimos de pad corresponden al microcontrolador empleado, cuyo tamaño es de 60x125um con una distancia entre los mismos de aproximadamente 125um.

4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

4.1 IMPRESIÓN EN FORMA FLEXIBLE

Se han valorado diversas técnicas para la impresión de los circuitos diseñados en forma de electrónica flexible, probando, de los métodos descritos en el estado del arte de este documento, la impresión por tinta (inkjet) y el método de serigrafía.

4.1.1. IMPRESIÓN MEDIANTE INKJET

En este método el circuito es formado mediante la deposición de una tinta conductora, empleando una impresora especial diseñada para la realización de este tipo de circuitos. Concretamente, se ha empleado una impresora Dimatrix de Fujifilm, empleando una tinta especial para este tipo de procesos y como sustrato un film de tereftalato de polietileno o PET transparente de espesor igual a 125um desarrollado por la empresa Normandy Coating®.



Figura 23: Impresora Dimatrix de Fujifilm

En total, se han realizado 11 muestras. La elección del número de capas a depositar se ha elegido visualmente, atendiendo a las porosidades presentes en

la impresión. Para la primera muestra se ha empleado un diámetro de deposición de 30 μm , empleando para las posteriores un valor de 40 μm debido a que visualmente se apreciaba una mejor continuidad de las pistas con este segundo diámetro. A la muestra de 30 μm se le aplicó una única capa de deposición, mientras que para el segundo grupo se han depositado dos capas de tinta en las muestras 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10 y 11. Para las no incluidas en las anteriores se ha aplicado una capa.

Como resultado se ha observado que en algunas se han obtenido buenas resoluciones de pista, sin presencia ninguna de cortos o prácticamente sin ella. La mayoría de estas muestras pertenecen al grupo de aquellas que han recibido dos capas en vez de una, lo que indica que la calidad de la muestra, dependiente en mayor parte de la porosidad y uniformidad de las pistas, depende de las pasadas realizadas.

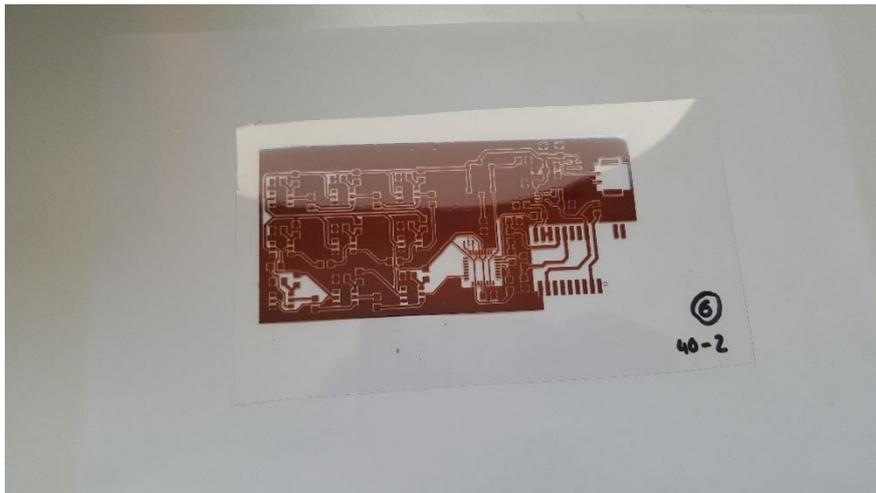


Figura 24: Muestra recién impresa

Tras imprimirse, las muestras se han curado en horno a 140°C durante 30 minutos, permitiendo a la tinta conformarse y adquirir las propiedades necesarias para la conducción. La siguiente imagen muestra el resultado de someter a la muestra de la imagen anterior (muestra 6) al proceso descrito.



Figura 25: Muestra tras superar el proceso de curado

Tras este paso, la impresión ha finalizado y ya podrían colocarse los componentes sobre el sustrato.

4.1.2. IMPRESIÓN MEDIANTE SERIGRAFÍA

El método de serigrafía se ha realizado tras haber probado el método anterior. A vistas de los resultados obtenidos mediante ink-jet y de los cálculos realizados para el ancho de pista en la placa para la tinta que se empleará, se ha llevado a cabo un pequeño rediseño de la placa realizada en el punto 3.6, de tal forma que sin modificar la posición de los componentes se ha aumentado lo máximo posible la separación entre pistas con valores de aislamiento de mínimo 500 μm , buscando evitar imperfecciones a la hora de colocar los componentes en la siguiente fase.

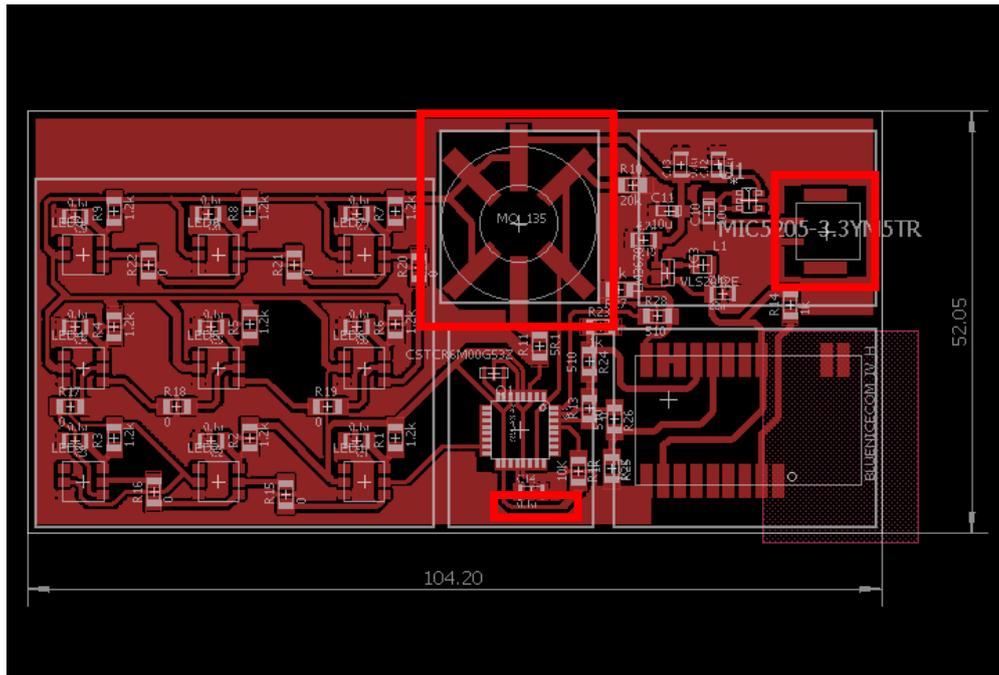


Figura 26: Modificaciones del diseño

Como sustrato se ha empleado un tipo de PET denominado Mylar A desarrollado por la empresa DuPont Teijin Films®. Este sustrato presenta unas buenas características físicas para los procesos de impresión a los que es sometido y es usado habitualmente en la empresa para el desarrollo de sistemas electrónicos flexibles.

El procedimiento de impresión para la serigrafía, que en este caso será plana, se centra en el empleo de una pantalla sobre la cual se esparce la tinta conductora, de tal forma que sólo una parte de ella pasa al sustrato, como se menciona en el subapartado 2.3.2 del estado del arte. En la siguiente figura puede observarse la pantalla en cuestión empleada para el desarrollo del dispositivo.



Figura 27: Pantalla de serigrafía con el dibujo del circuito

Es importante a la hora de imprimir las muestras el limpiar la pantalla cada vez que se realice el procedimiento. Esto se debe a que, al ser un procedimiento de serigrafía manual y al haber poca distancia entre las pistas y el plano de masa, el depositar tinta en una nueva muestra habiendo restos de la deposición anterior hace más fácil que pase más tinta de la necesaria, provocando que las pistas sean más grandes de lo debido y empeorando el resultado final. La siguiente imagen permite observar en detalle una de las muestras impresas.

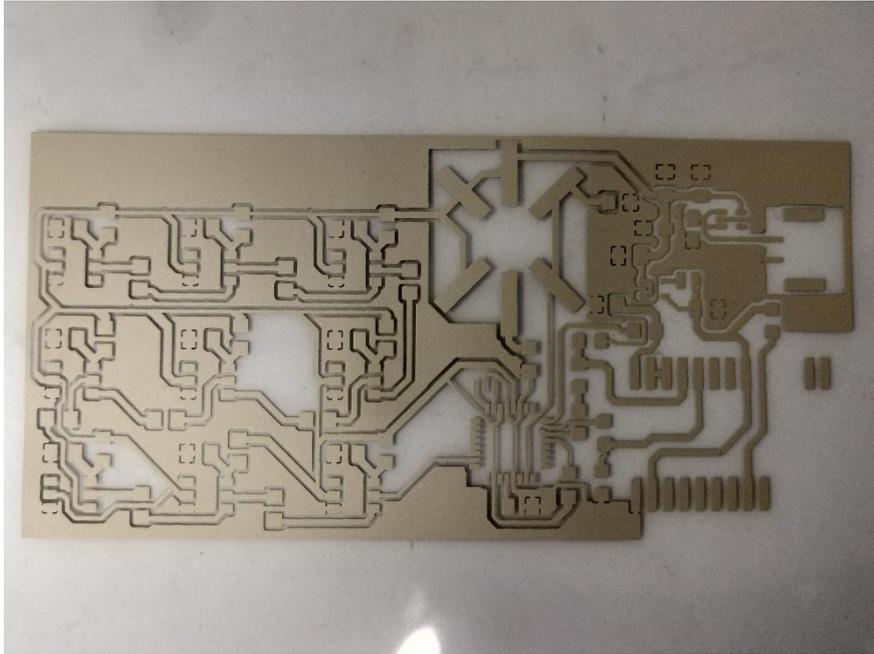


Figura 28: Muestra impresa mediante serigrafía plana

Una vez obtenido el circuito impreso, éste debe ser curado en horno a 120 °C durante 15 minutos para que la tinta solidifique y conduzca adecuadamente. Es importante no superar esta temperatura debido a que valores mayores dañarían permanentemente el circuito impreso y quedaría inservible.

4.2 COLOCACIÓN DE COMPONENTES

La colocación de los componentes en la placa diseñada difiere de los métodos usuales de soldadura por estaño empleados normalmente en la implementación de PCBs. Debido a las características del material constituyente de las pistas, debe emplearse un adhesivo específico que “suelde” los componentes a sus correspondientes pads y aplicar posteriormente un proceso de calentamiento adecuado a la tinta empleada.

Para la colocación se ha empleado un robot RS de Epson preparado para pick & place, permitiendo posicionar los componentes con una mayor precisión que a mano. El robot lleva en su extremo un cabezal diseñado específicamente por la empresa para el empleo de las herramientas de vacío y deposición de adhesivo, permitiendo así colocar componentes de forma rápida y precisa.



Figura 29: Fotografía del robot para Pick & Place

Tras la colocación del componente, la zona de deposición del adhesivo debe ser calentada a una temperatura en torno a los 120 °C durante 10 minutos, con el objetivo de que éste cure adecuadamente y mantenga al componente correctamente adherido al circuito. Dicho procedimiento se ha llevado a cabo empleando una cama caliente como la mostrada a continuación.



Figura 30: Cama caliente MK2a empleada en funcionamiento

Tras el proceso de calentamiento, el componente estaría fijado y podría pasarse al siguiente. Cabe mencionar que ejercer presión sobre los componentes mientras el adhesivo solidifica ayuda a mejorar el área de adhesión del mismo. El procedimiento es idéntico para cualquier componente con tecnología de inserción superficial o SMD. Los resultados pueden observarse en detalle en la siguiente imagen.

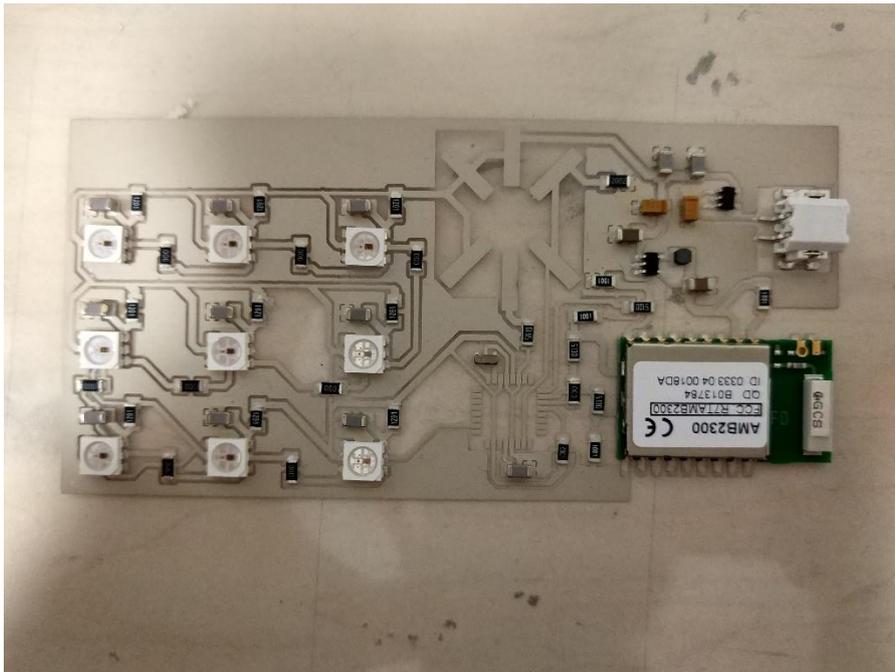


Figura 31: Placa con la mayoría de los componentes adheridos

4.3 AUMENTO DE RIGIDEZ DE LA PLACA

El circuito obtenido tiene un grado elevado de flexibilidad, y puede doblarse sin problema a ángulos extremos sin que los componentes más pequeños (resistencias, condensadores, LEDs,...) sufran por ello. Sin embargo, la presencia de componentes con un gran número de patillas (μ C) o de gran tamaño en comparación al resto de elementos (módulo Bluetooth, header de la batería) hacen que sea necesario dotar al circuito de mayor rigidez sin llegar a perder toda su flexibilidad, ya que es una característica importante del mismo. Por ello, para mantener el mayor grado de flexibilidad posible, se colocarán “zonas rígidas” sólo alrededor de estos componentes más críticos.

Se han valorado diversos materiales a emplear, realizando las primeras pruebas con metacrilato transparente. Para ello, se han recortado dos unidades de este material de forma rectangular y de un tamaño de 5x4 cm y 6.5x5 cm. Dichas muestras se pueden observar en la siguiente ilustración.

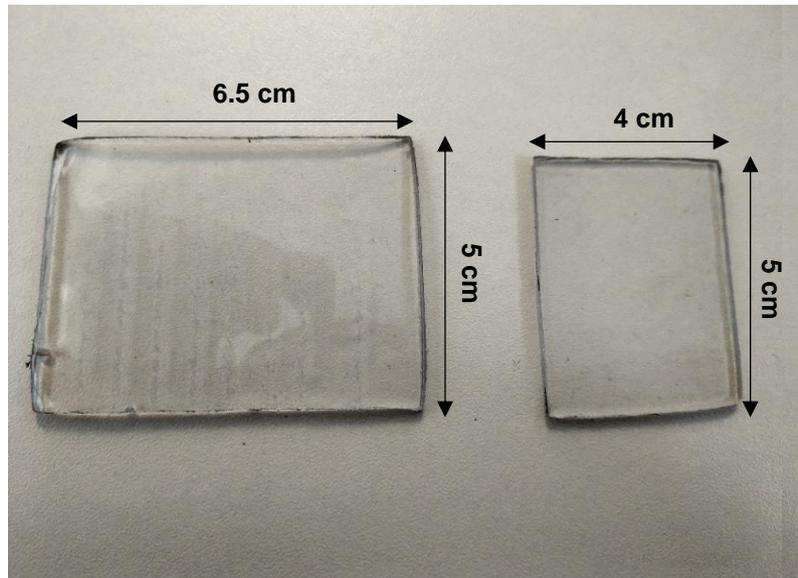


Figura 32: Muestras recortadas de metacrilato

Ambas muestras se han calentado entonces a 140°C durante 15 minutos para observar su resistencia al calor y a los procesos de calentamiento del adhesivo empleado para los componentes. Tras el proceso de calentamiento, se ha observado que la placa de mayor tamaño se ha deformado en sus extremos, curvándose de una forma que resulta inadecuada para ser aplicada en el circuito impreso.

Por otro lado, la muestra de menor tamaño, dimensionada para ser colocada bajo el módulo Bluetooth (el que tiene asociado el footprint más grande del circuito) se ha mostrado invariable en forma al calentamiento sometido, lo que permite deducir que a tamaños más pequeños tampoco se verá modificada.

Teniendo en cuenta lo obtenido, se puede afirmar que el metacrilato es un material adecuado para aumentar la rigidez de la placa localmente.

5 RESULTADOS

5.1 MÉTODOS DE IMPRESIÓN

Las muestras realizadas mediante tecnología ink-jet, a pesar de tener un buen acabado final, presentan imperfecciones en las pistas, haciendo que éstas sean irregulares y en las zonas con menos aislamiento hagan contacto entre ellas, lo que deja inservible el circuito. Además, la calidad de la tinta una vez curada no es especialmente buena, al poder ensuciarse y empeorar su conductividad al contacto de los dedos y rayarse con relativa sencillez.

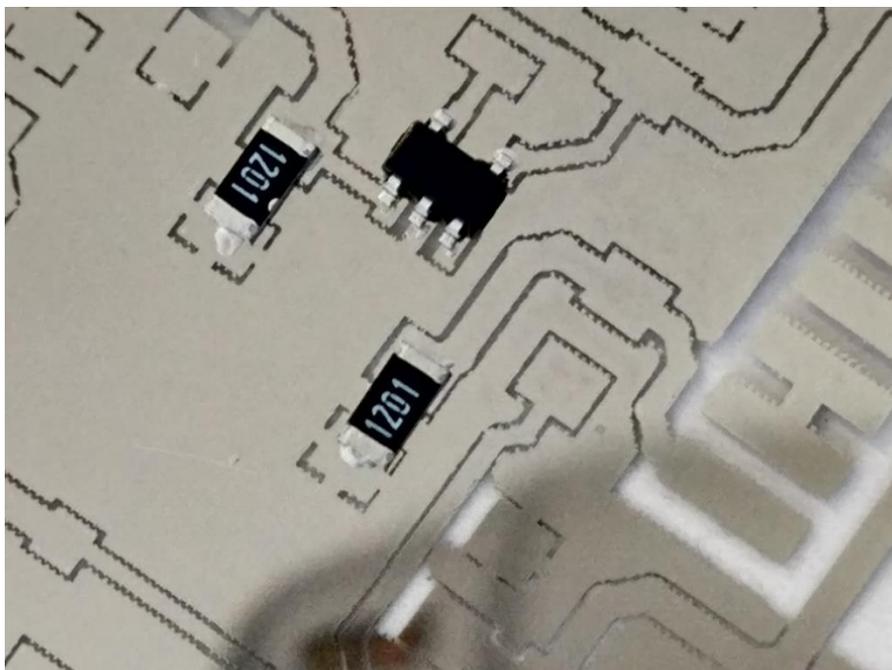


Figura 33: Zoom de una de las muestras realizada con ink-jet

Por otro lado, las muestras obtenidas mediante serigrafía plana muestran una mayor calidad en todos los aspectos. Si bien su proceso de fabricación, al resultar manual, depende en gran medida de cómo de ajustado al método teórico se aplique, en aquellas donde se realiza adecuadamente las pistas tienen una forma mucho más uniforme. Sus pistas están separadas perfectamente unas de otras incluso en las zonas más críticas como en la relativa a los pines del microcontrolador. Además, el material presenta una mayor resistencia a rayarse o ensuciarse que la tinta de la ink-jet.

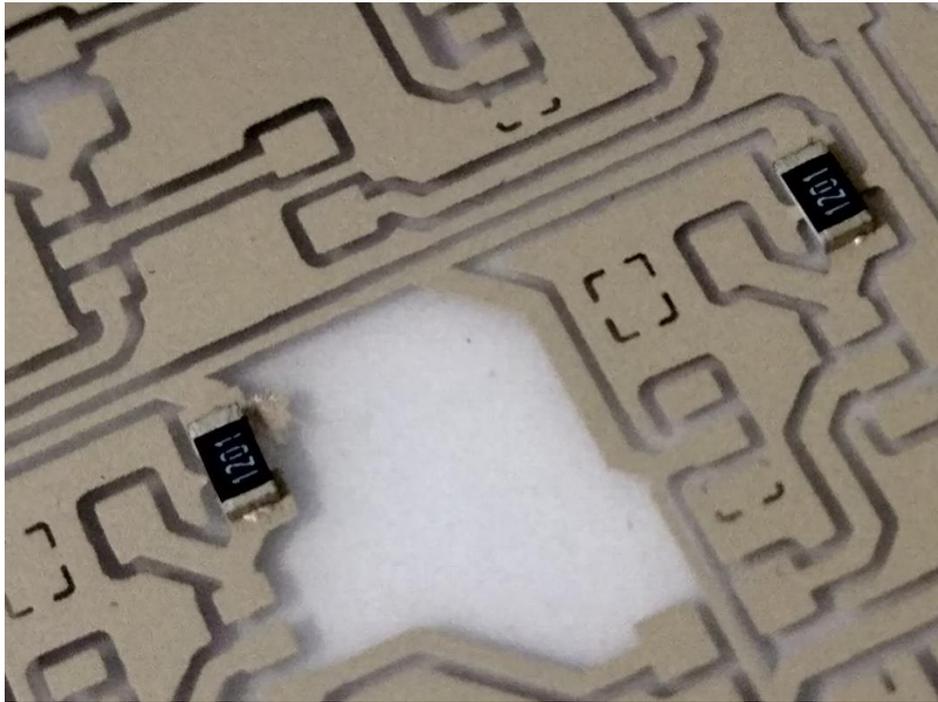


Figura 34: Zoom de una de las muestras realizadas con serigrafía

5.2 PRUEBAS Y EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO

Se han realizado diversas pruebas tanto eléctricas como de esfuerzo a la placa flexible diseñada con el objetivo de comprobar su correcto funcionamiento y factibilidad de poder ser implementado de forma comercial en un futuro.

En lo relativo a las pruebas de carácter eléctrico, el circuito ha sido probado alimentándolo a través de una fuente de alimentación a un valor de tensión igual que el dictaminado en el diseño para la batería que sería empleada cuando se implementase finalmente. Se ha podido comprobar que el sistema funciona correctamente, aunque debido a las características de la impresión y del sustrato lo ha hecho en cortos periodos de tiempo y alternados, nunca con una continuidad en el tiempo elevada.

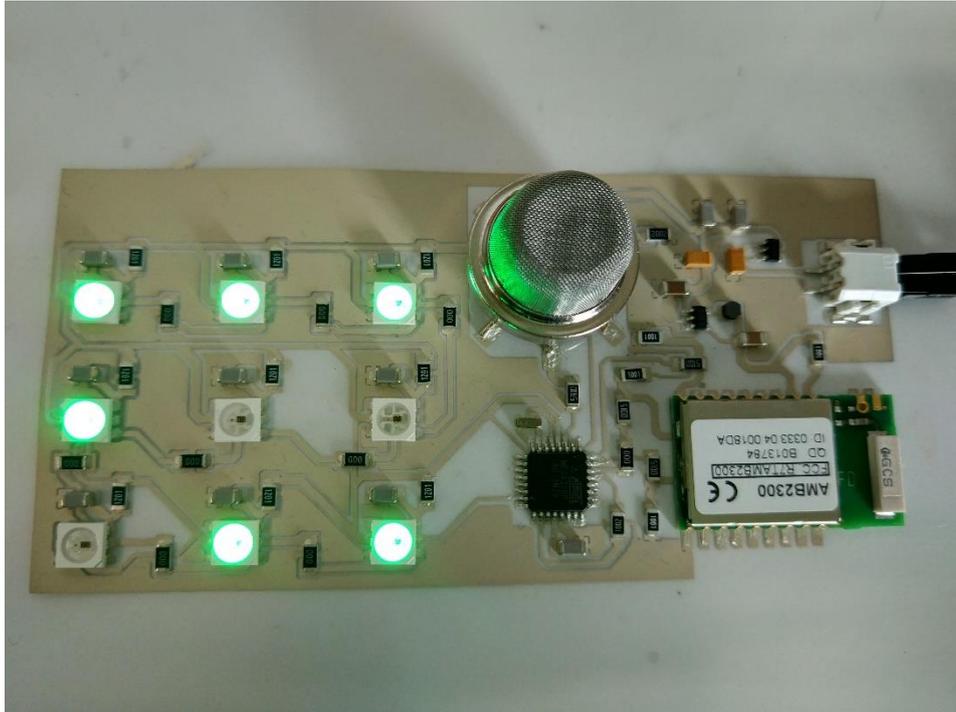


Figura 35: Dispositivo diseñado en funcionamiento

Tras evaluar en detalle el comportamiento de la placa flexible, estos fallos de funcionamiento se deben esencialmente a los siguientes factores:

- La tinta presenta una más que adecuada conductividad a la electricidad, pero su homogeneidad sobre la pista no es perfecta. De este modo, aunque el ancho de las pistas diseñadas es considerablemente elevado para una placa de circuito impreso pueden producirse problemas de conductividad cuyo mayor problema es su difícil localización dentro del circuito.
- El sustrato no modifica sus características con las temperaturas de curado empleadas, pero sí ve su forma ligeramente modificada, provocando la aparición de pequeñas irregularidades en forma de montículos que pueden afectar al estado del adhesivo de los componentes o a problemas de conductividad.
- La placa es muy sensible al tacto, que puede afectar al pegado de los componentes y por ende a su funcionamiento.

En lo relativo a las pruebas de esfuerzo realizadas sobre el circuito, se ha plegado sobre sí mismo a diversos ángulos, pasando de poco pronunciamiento

a valores mayores a los 45°. Como resultado se ha observado que la rigidez aportada al mismo mediante las placas de metacrilato favorece la resistencia de los componentes a posibles despegues de los componentes. Por ello, en este ámbito no sería necesario aplicar ninguna solución a mayores.

Además de esfuerzos de flexión se ha sometido también a vibraciones. Se ha sacudido el circuito con las propias manos en vertical para observar el estado de adhesión de los componentes. Incluso en los casos más extremos los componentes se han conservado pegados con consistencia, siendo los que peor aguantaron el esfuerzo los reguladores de tensión, debido a su tamaño excesivamente pequeño y a la dificultad de la adhesión de los mismos.

Las soluciones a los problemas descritos en estos párrafos se comentarán en el siguiente apartado de análisis de resultados.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 DISEÑO DEL CIRCUITO

Los componentes empleados son en general de bajo coste, pensados para la realización de prototipos funcionales. En este trabajo han resultado de utilidad debido a que han presentado unas prestaciones más que adecuadas para las funcionalidades requeridas. En caso de que se quisiese construir un dispositivo para uso más profesional y pensado para ser comercializado posiblemente sería necesario elegir componentes más adecuados para las condiciones ambientales en las que se encontraría.

El diseño del circuito impreso podría simplificarse en el caso de emplear vías para comunicar los componentes de forma más eficiente y sin tener que pasar líneas por debajo de ellos, asegurando así el evitar posibles interferencias electromagnéticas o cortocircuitos. Aunque esta técnica ya se ha empleado antes en la empresa en muestras flexibles de otros circuitos, nunca se ha

probado en un circuito de mayor complejidad como el diseñado en este trabajo, por lo que dicha posibilidad queda en el aire.

7.2 DISEÑO DEL PROGRAMA

Como se comenta en el subapartado 3.2.1 de este documento, la utilización de un microcontrolador multinúcleo permitiría implementar el State Chart diseñado con mecanismos de simultaneidad. Con esto se conseguiría una ejecución del programa más rápida y eficiente. Hay que contar también con que un microcontrolador más complejo supondría un mayor coste que quizás para la aplicación diseñada sea innecesario.

7.3 IMPRESIÓN EN FORMA FLEXIBLE

A la vista de las muestras obtenidas mediante ambos métodos de impresión, puede confirmarse que el método de serigrafía plana permite obtener unos resultados más fiables en lo relativo a la calidad de las pistas y a la conductividad del material empleado como sustitutivo del cobre.

El sistema diseñado podría ser más portable disminuyendo su tamaño, para lo cual podrían usarse componentes de menor tamaño que favoreciesen esta tarea. Debido a que la deposición del adhesivo se hizo empleando jeringas de un determinado diámetro de boquilla, habría que llegar a una solución de compromiso entre tamaño y diámetro de deposición, o bien intentar recurrir a tamaños de jeringa más pequeños. Con el tamaño actual de placa se puede considerar que se han cumplido correctamente las especificaciones de diseño sin comprometer su portabilidad para ser incluido en un equipo de protección individual.

Es importante tener en cuenta que los dos métodos no comparten el mismo diseño de placa, por lo que la comparación final entre ambos métodos queda sujeta a posibles pruebas posteriores donde se pruebe el diseño empleado en la serigrafía mediante la técnica de ink-jet. A priori, deberían obtenerse mejores

resultados empleando el diseño modificado, aunque sin llegar a ser tan buenos como los de la serigrafía.

7.4 PRUEBAS DEL DISPOSITIVO

Como se menciona en el subapartado 5.2, tras la realización de pruebas el dispositivo presenta pequeños problemas que afectan a su correcto funcionamiento en el ámbito eléctrico, los cuales se mencionan en los siguientes párrafos. A pesar de que el diseño del dispositivo ha mostrado ser correcto, los problemas aparecidos en este ámbito dificultan un rendimiento normal del mismo.

En lo relativo al problema de la uniformidad y conductividad de la tinta, el empleo de tintas alternativas más densas podría solventar las dificultades aparecidas en este ámbito, permitiendo una conductividad constante en las líneas del circuito. Sin embargo, un exceso de densidad en la tinta no sería adecuado, debido a que podría ser demasiado sólida y no permitiría una buena impresión del circuito mediante serigrafía. También podría contemplarse como opción el empleo de tintas elásticas, que estén más preparadas ante posibles deformaciones del sustrato y que evitarían que éstas se deformasen al aplicar esfuerzos de carácter tensional o elástico sobre la placa resultante.

En cuanto a los problemas de irregularidades presentes al calentar el sustrato, podría buscarse algún otro tipo de material que soporte mejor las altas temperaturas, de tal manera que durante los procesos de curado de la tinta y del adhesivo no sufra deformaciones que puedan impedir un adecuado funcionamiento posterior. Además, la gran cantidad de sustratos y tejidos existentes que permitan imprimir sobre ellos circuitos eléctricos puede facilitar la búsqueda de un material más adecuado.

Para finalizar, el problema de la excesiva sensibilidad por parte del dispositivo a la presión de las propias manos del operario que monta el circuito sobre el sustrato podría solucionarse encapsulando el mismo pegando una lámina de sustrato (bien del mismo tipo que el de la base o bien de cualquier otro mientras

no sea conductor) tal que los componentes queden adecuadamente sellados y presionados sobre el circuito evitando falsos contactos o despegues. Además, también evitaría que la tinta se pudiese rayar, problema por el que se puede ver bastante afectada si se rayase con algún material afilado. Si se optase por esta alternativa en un futuro, es necesario recordar que habría que practicar un pequeño agujero circular en el encapsulado superior para permitir que el sensor de gases tuviese su malla accesible al exterior, de tal forma que las medidas de concentraciones no sean falseadas.

7 CONCLUSIONES

Como se ha podido ver a lo largo del trabajo, el diseño de dispositivos mediante electrónica flexible permite desarrollar aplicaciones de gran interés las cuales serían difíciles de ejecutar mediante métodos de desarrollo de circuitos electrónicos convencionales.

Además de las etapas inherentes al desarrollo de cualquier dispositivo electrónico (diseño del circuito esquemático, etapas de alimentación, circuito impreso, ...) la impresión mediante tecnología flexible añade nuevos métodos a la implementación física de los circuitos, obteniendo unos resultados que si bien no han permitido en este caso obtener un grado de fiabilidad equivalente al obtenido por métodos convencionales, demuestran que estudiando y mejorando los materiales y procedimientos empleados pueden obtenerse dispositivos que aúnen la fiabilidad y el rendimiento obtenidos mediante los métodos de impresión de circuitos comunes con las ventajas de la electrónica flexible.

Con este trabajo se pretende demostrar así que la realización de sistemas electrónicos desarrollados mediante esta tecnología innovadora es factible, y que se trata de un campo en el cual con la investigación y los medios adecuados pueden lograrse grandes resultados de cara a una visión comercial no sólo en el ámbito de la seguridad industrial, si no en todos los campos en los que se encuentra presente la electrónica.

8 DOCUMENTOS DEL PROYECTO

El presente proyecto cuenta con todos los documentos que se mencionan a continuación. Estos documentos se encuentran agrupados en el siguiente orden:

Documento I: Memoria

ANEXOS:

Anexo I: Cálculos

Anexo II: Planos

Anexo III: Código Fuente

Anexo IV: Planificación

9 REFERENCIAS

- [1] U. C. III, «Una cámara infrarroja detecta fugas de gases industriales en tiempo real,» SINC, 2 Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Una-camara-infrarroja-detecta-fugas-de-gases-industriales-en-tiempo-real>. [Último acceso: 8 Febrero 2017].
- [2] P. J. Piacente, «Crean sensores ópticos que optimizan la detección de gases contaminantes,» Tendencias21, 7 Diciembre 2009. [En línea]. Available: http://www.tendencias21.net/Crean-sensores-opticos-que-optimizan-la-deteccion-de-gases-contaminantes_a3908.html. [Último acceso: 8 Febrero 2017].
- [3] O. LTD, *MQ-135 Gas Sensor*, Plovdiv, 2017.
- [4] I. Safety Requeriments, «Functional Safety for Programmable Electronics Used in PPE: Best Practice Recommendations,» NIOSH Contract 200-2003-02355 , 2007.
- [5] H. Winchester, «A brief history of wearable tech,» Wareable, 6 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.wareable.com/wearable-tech/a-brief-history-of-wearables>.
- [6] C.-C. Tsai, «Recent development in Flexible Electronics,» de *Opto-Electronics and Communication Conference (OECC)*, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
- [7] B. Gates, «Flexible Electronics,» *Science*, vol. 323, pp. 1566-1567, 2009.
- [8] A. S. W.S. Wong, *Flexible Electronics: Materials and Applications*, Springer, 2009.
- [9] A. A. M. C. A. Nathan, «Flexible Electronics: The Next Ubiquitous Platform,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 1486-1517, 2012.

-
- [10] ATMEL, *ATMEGA328P 8-Bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash*, San Jose, 2015.
- [11] Arduino, «MQ Gas Sensors,» Arduino LTD, 2017. [En línea]. Available: <http://playground.arduino.cc/Main/MQGasSensors>. [Último acceso: 10 Abril 2017].
- [12] WORLDSEMI, *WS2812B Intelligent Control LED Integrated Light Source*, 2013.
- [13] AMBER, *AMB2300 Bluetooth-Module with UART-Interface and Integrated Chip-Antenna*, Köln, 2007.
- [14] MICREL, *MIC5205 150mA Low-Noise LDO Regulator*, San Jose, 2004.
- [15] T. INSTRUMENTS, *LM3670 Miniature Step-Down DC-DC Converter for Ultralow Voltage Circuits*, Dallas, 2016.
- [16] e-Gizmo, «GitHub,» GitHub Inc, 2017. [En línea]. Available: <https://github.com/e-Gizmo/SM/blob/master/SM.h>. [Último acceso: 28 Marzo 2017].
- [17] Adafruit, «GitHub,» GitHub Inc, 2017. [En línea]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_NeoPixel. [Último acceso: 2017 Marzo 28].

ANEXO I:
CÁLCULOS

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	CÁLCULOS	4
2.1	ALIMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	4
2.1.1.	DIMENSIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR DC-DC.....	4
2.2	CAPACIDAD DE LA BATERÍA.....	8
2.3	CALIBRACIÓN DEL SENSOR	6

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: corriente máxima del inductor.....	4
Ecuación 2: cálculo de inductancia (Método 1)	4
Ecuación 3: cálculo de inductancia (Método 2)	4
Ecuación 4: corriente de pico	5
Ecuación 5: capacidad de la batería	8
Ecuación 6: cálculo de R_o	7
Ecuación 7: concentración en función de R_s/R_o	7

1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente documento se enunciarán y resolverán todos aquellos cálculos relacionados con aspectos de diseño que se hayan mencionado a lo largo de la memoria del trabajo.

2 CÁLCULOS

2.1 ALIMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO

2.1.1. DIMENSIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR DC-DC

La etapa de 3.3V estará gobernada por el convertidor DC-DC reductor LM3670. Según lo descrito en la hoja de características del componente, el cálculo del inductor a la salida del convertidor deberá seguir uno de los dos siguientes métodos:

- Método 1: la corriente total es la suma de la corriente de la carga y de la de rizado del inductor:

$$I_{MAX} = I_{LOAD} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} \quad (1)$$

$$V_{OUT} = I_{LOAD} + \left(\frac{V_{IN} - V_{OUT}}{2 \times L} \right) \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \left(\frac{1}{f} \right) \quad (2)$$

- Método 2: se escoge un inductor que sea capaz de soportar una corriente límite de 700mA:

$$L \geq \left(\frac{V_{IN} - V_{OUT}}{I_{PP}} \right) \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \left(\frac{1}{f} \right) \quad (3)$$

Con la corriente de pico I_{pp} de valor según el datasheet igual a:

$$I_{PP} = 117\text{mA} + \frac{V_{IN}}{64\Omega} \quad (4)$$

El cálculo del condensador de entrada al circuito no se considera necesario, al especificarse en el datasheet del componente que un condensador de entrada de 4.7uF se considera más que suficiente para la mayoría de aplicaciones.

Como condensador de salida, debe elegirse uno que permita el menor rizado posible. Aunque se proporciona una ecuación para el cálculo de la capacitancia, se recurre a que según las características un valor como mínimo de 10uF sería suficiente. Por ello, se escoge un valor ligeramente más elevado (22uF) para actuar sobre seguro.

De esta forma, el cálculo de la inductancia se llevará a cabo según las anteriores ecuaciones. Según el método 1:

$$V_{OUT} = I_{LOAD} + \left(\frac{V_{IN} - V_{OUT}}{2 \times L} \right) \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \left(\frac{1}{f} \right) =$$

$$3.3\text{V} = 0.1\text{A} + \left(\frac{1.7\text{V}}{2 \times L} \right) \left(\frac{3.3\text{V}}{5\text{V}} \right) \left(\frac{1}{1000 \times 10^{-6}} \right) =$$

$$L = 175.3 \text{ mH}$$

Se calcula también la inductancia por el segundo método, más conservador, para evitar males mayores aunque se sobredimensione. En este caso:

$$L \geq \left(\frac{V_{IN} - V_{OUT}}{I_{PP}} \right) \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \left(\frac{1}{f} \right) =$$

$$L \geq \left(\frac{5\text{V} - 3.3\text{V}}{0.195\text{A}} \right) \left(\frac{3.3\text{V}}{5\text{V}} \right) \left(\frac{1}{1000 \times 10^{-6}\text{Hz}} \right) =$$

$$L \geq 5.75 \mu\text{H}$$

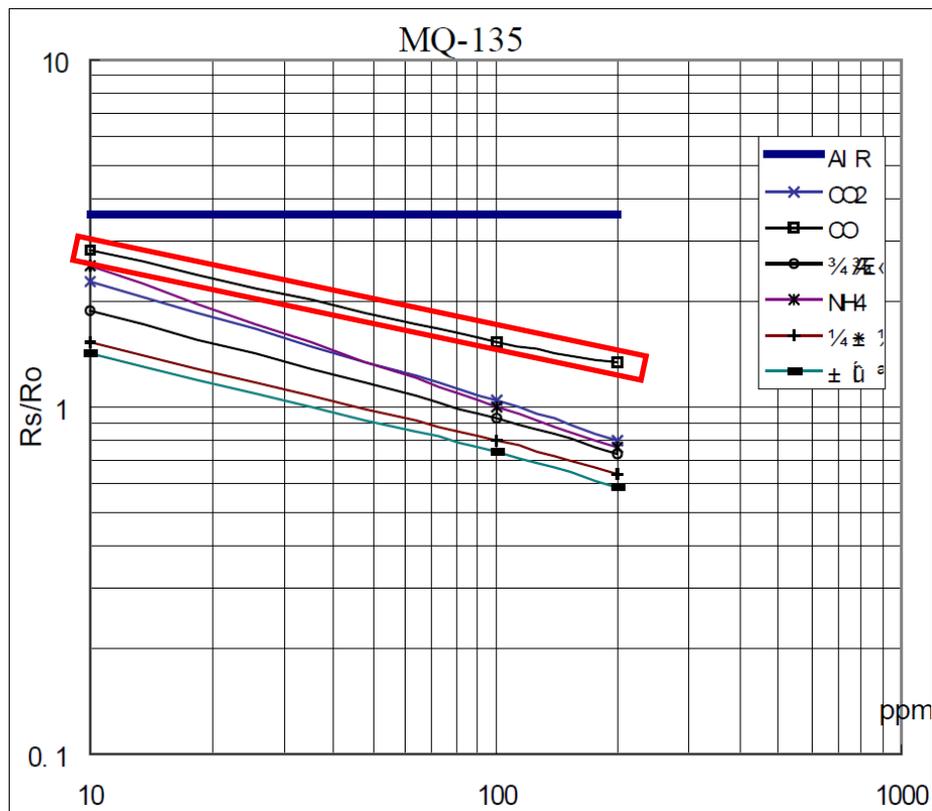
Debido a que no se van a llegar a alcanzar tales corrientes al estar destinado el convertidor a alimentar únicamente al módulo Bluetooth, se puede escoger una inductancia de menor valor. Por ello, se ha elegido comercialmente un valor de 4.7uH.

2.2 CALIBRACIÓN DEL SENSOR

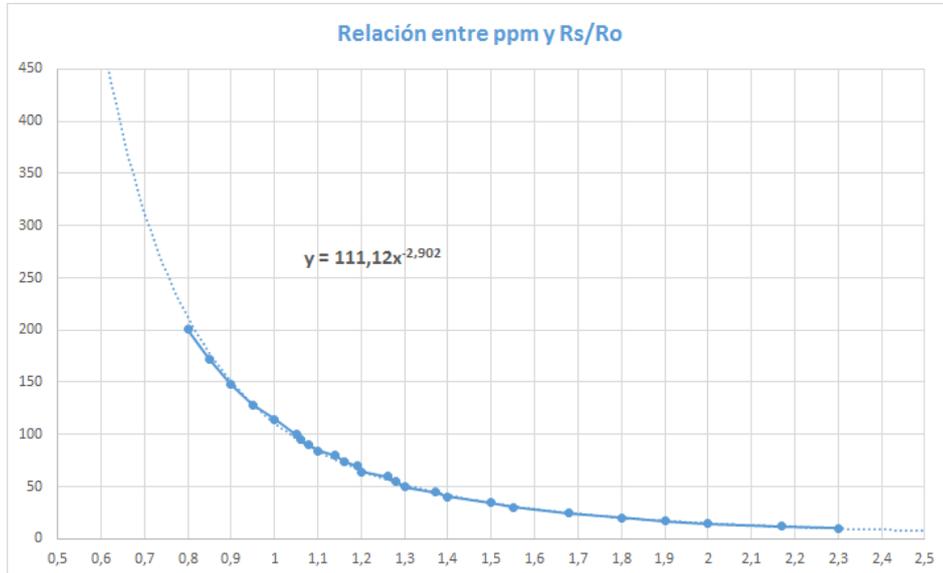
El sensor de gases empleado en el prototipo (MQ-135) necesita de una calibración previa para garantizar que proporciona una lectura acorde con la realidad.

El procedimiento de calibración empleado consta de los siguientes pasos:

1. Dada la hoja de características del sensor, se recogen los datos de la gráfica logarítmica correspondientes al gas a detectar (CO2 en este caso):



- Dichos datos se plasman en una hoja de cálculo y se confrontan en una gráfica lineal con una línea de tendencia potencial para observar la relación logarítmica entre las variables:



- Dada una concentración conocida del gas se mide el valor correspondiente de relación Rs/Ro, correspondiente al eje de abscisas.
- Midiendo el valor obtenido en ese entorno de la lectura proporcionada por el microcontrolador de la resistencia en el pin (Rs), puede conocerse el valor de Ro despejando la relación:

$$Ro = \frac{Rs}{\text{relación (valor de x)}} \quad (5)$$

- Conocidos los valores de Ro y de la ecuación de la línea de tendencia, puede obtenerse la concentración del gas a partir de la ecuación:

$$y(\text{ppm}) = 111,12 \times \left(\frac{Rs}{Ro}\right)^{-2,902} \quad (6)$$

Empleando esta ecuación se puede obtener con facilidad el valor de concentración, dada la Ro (conocida tras la calibración y constante) y la Rs (variable en función de la lectura).

Para el caso dado, y calibrando el sensor para 400 ppm de CO₂, el valor de R₀ que se empleará será, para una lectura del microcontrolador de 15.91kΩ:

$$R_0 = \frac{15.91k\Omega}{0.64} =$$

$$R_0 = 24.859 \text{ k}\Omega$$

2.3 CAPACIDAD DE LA BATERÍA

El cálculo de la capacidad de la batería, conocido el consumo del circuito mostrado en el apartado 3.4 del documento Memoria, se realizaría a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Capacidad (mAh)} = \text{Consumo(mA)} \times \text{Duración(h)} \quad (7)$$

La unidad típica de esta propiedad se da comercialmente en miliamperios/hora (mAh), por lo que se trabajará en estas unidades.

Para el consumo actual del circuito, y escogiendo como ejemplo una batería de 3600 mAh, la duración de la alimentación sería de:

$$\text{Duración} = \frac{3600\text{mAh}}{230.5\text{mA}} =$$

$$\text{Duración} = 15.16 \text{ h}$$

Para el caso del consumo final, el valor de la duración es:

$$\text{Duración} = \frac{3600\text{mAh}}{191.5\text{mA}} =$$

Duración = 18.80 h

2.4 DIMENSIONAMIENTO DE LAS PISTAS DE PCB

Es necesario conocer el ancho de pista mínimo que se necesitará para el diseño de la PCB, sin atender previamente a posibles requisitos establecidos por los métodos de electrónica impresa empleados.

Para el cálculo de las pistas se recurrirá a las siguientes expresiones. Previo paso al cálculo de los anchos de pista es necesario calcular el valor del área:

$$\text{Area} = \left(\frac{I}{k \times T^b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (8)$$

Donde:

I = corriente en el circuito (A)

T = temperatura del circuito (°C)

k = 0.048 para capas externas según IPC-2221

b = 0.44 para capas externas según IPC-2221

c = 0.725 para capas externas según IPC-2221

Partiendo de la corriente final estimada en la memoria de 191.5 mA, calculando el área de forma conservadora para un valor de 200 mA, y un valor de temperatura en torno a los 50°C debido al calentador incluido en el sensor de gas, se calcula el valor del área suponiendo una temperatura ambiente de 20°C:

$$\text{Area} = \left(\frac{0.2\text{A}}{0.048 \times (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} =$$

$$\text{Area} = 0.909 \text{ mil}^2 = 0.587 \text{ mm}^2$$

Partiendo del resultado de área obtenido, el cálculo de la pista atiende a la siguiente expresión:

$$\text{Ancho} = \left(\frac{\text{Area}}{\text{Grosor} \times 1.378} \right) \quad (9)$$

Partiendo de un valor de grosor de la tinta empleada de 20 μm , el valor de ancho de pista mínimo que se necesitará será de:

$$\text{Ancho} = \left(\frac{0.909 \text{mil}^2}{0.57 \times 1.378} \right) =$$

$$\text{Ancho} = 1.1 \text{ mil} = 280 \mu\text{m}$$

Dado este ancho de pista, y viendo que es inferior a los mínimos obtenibles por los métodos de impresión descritos en el apartado 3.7 de la memoria, se escogerán para la PCB anchos que no sean inferiores a las restricciones de diseño dadas por los métodos empleados.

ANEXO I:
PROGRAMACIÓN

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	3
2	MICROCONTROLADOR (ARDUINO).....	3

1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente documento se recogerán todos los códigos de programación desarrollados para este trabajo.

2 MICROCONTROLADOR (ARDUINO)

```
3.  /****DETECTOR DE GASES****/
4.  //LIBRERÍAS
5.  #include "SM.h"
6.  #include "Adafruit_NeoPixel.h"
7.  #include "WS2812_Definitions.h"
8.
9.
10. //CONSTANTES
11. #define PIN_GAS A0           //Pin empleado para lectura analógica
    del sensor MQ135
12. #define PIN_LED 11          //Pin empleado para encendido/apagado
    de los LEDs
13. #define PIN_RESET 3         //Pin empleado para el reset del
    módulo Bluetooth
14. #define LED_COUNT 9         //Número de LEDs disponibles para el
    control
15. #define RL 20               //Valor de la resistencia de carga en
    kohm para MQ135
16.
17.
18. //VARIABLES
19. unsigned int fin_SM_1 = 0;  //Variable empleada en la evolución
    del StateChart 1
20. unsigned int fin_SM_2 = 0;  //Variable empleada en la evolución
    del StateChart 2
21. unsigned int fin_SM_3 = 0;  //Variable empleada en la evolución
    del StateChart 3
22. int lectura_analog;        //Lectura analógica del sensor MQ135
23. float lectura_voltaje;     //Valor del voltaje en el pin
    analógico
24. float lectura_resist;      //Valor de la resistencia en el pin
    analógico
25. float lectura_ppm;         //Valor en ppm de la lectura del gas
26. float val = 0.0;          //Variable auxiliar
27. float Ro = 24859;          //Resistencia de calibración para CO2
    (obtenida por regresión)
28. float coef[2] = {111.12,-2.902}; //Coeficientes de la
    ecuación del MQ135 para ppm
29. int cont = 0;              //Contador de detecciones verídicas de
    concentraciones peligrosas
30. Adafruit_NeoPixel leds = Adafruit_NeoPixel(LED_COUNT, PIN_LED,
    NEO_GRB + NEO_KHZ800);
31.
32.
33. //FUNCIONES AUXILIARES
34. //Función auxiliar para apagado de los LEDs
```

```
35. void clearLEDs()
36. {
37.   for (int i = 0; i < LED_COUNT; i++)
38.     leds.setPixelColor(i, 0);
39. }
40.
41. //Calcula el valor del voltaje en el pin analógico
42. float calcular_volt(int lect) {
43.   float result = 0.0;
44.   result = float(lect * (5.0 / 1023.0));
45.
46.   return result;
47. }
48.
49. //Calcula el valor de la resistencia en el pin analógico
50. float calcular_res(int lect, int load) {
51.   float result = 0.0;
52.   result = float(load - (load / 1023.0) * lect);
53.
54.   return result;
55. }
56.
57. //Calcula el valor de la concentración en ppm por equivalencia de
    pendientes (aproximación lineal)
58. float calcular_ppm(float lect, float Ro, float *coef) {
59.   float result = 0.0;
60.   result = coef[0] * pow((lect * 1000) / Ro, coef[1]);
61.
62.   return result;
63. }
64.
65.
66. //MÁQUINA DE ESTADOS
67. //Declaración del StateChart y los estados
68. SM DetectorStateChart(super_estado);
69. SM Lectura(leer_dato);
70. SM Envio(enviar_lectura);
71. SM LED(LED_verde);
72.
73.
74. //CONFIGURACIÓN INICIAL
75. void setup() {
76.   pinMode(PIN_LED, OUTPUT); //Se configura el pin del LED como
    salida (PWM)
77.   pinMode(PIN_RESET, OUTPUT); //Se configura el pin del RESET
    como salida
78.
79.   digitalWrite(PIN_RESET, LOW); //Se resetea inicialmente el
    módulo
80.   delay(100); //Se espera un tiempo
81.   digitalWrite(PIN_RESET, HIGH); //Se vuelve a poner a uno para
    encenderlo
82.
83.   leds.begin(); //Se inicializan los LEDs
84.   clearLEDs(); //Se apagan los LEDs
85.   leds.show();
86.   leds.setBrightness(75); //Se establece el brillo de los
    LEDs
87.   Serial.begin(9600); //Se comienza la comunicación
    serie
88. }
```

```

89.
90.
91. //CONTROL DEL STATECHART
92. void loop() {
93.     EXEC(DetectorStateChart);
94.
95.     if ((fin_SM_1 == 1) && (fin_SM_2 == 1) && (fin_SM_3 == 1))
96.         DetectorStateChart.Set(synchro);
97.
98.     if(DetectorStateChart.Finished) {
99.         Lectura.Set(Leer_dato);
100.         Envio.Set(enviar_lectura);
101.         if(lectura_ppm > 600) {           //Prueba para el caso del
CO2 (~400 ppm en aire)
102.             cont++;
103.             if(cont >= 6)               //Se consideran cinco
positivos (medio minuto)
104.                 LED.Set(LED_rojo);
105.         }
106.         else {
107.             cont = 0;
108.             LED.Set(LED_verde);
109.         }
110.         DetectorStateChart.Set(super_estado);
111.     }
112. }
113.
114. //Función para el superestado general de la máquina
115. State super_estado() {
116.     EXEC(Lectura);
117.     EXEC(Envio);
118.     EXEC(LED);
119. }
120.
121. //Función de lectura del dato en el conversor AD del micro
122. State leer_dato() {
123.     val = 0.0;
124.     for(int i = 0; i < 100; i++)         //Se toman cien
señales y se realiza el promedio
125.     {
126.         lectura_analog = analogRead(PIN_GAS);
127.         val += lectura_analog;
128.         delay(50);                       //Se establece un
pequeño retardo temporal entre muestras
129.     }
130.     val = val / 100.0;
131.
132.     Lectura.Set(conv_dato);
133.     EXEC(Lectura);
134. }
135.
136. //Conversión de la lectura a un valor de concentración en
partes por millón (ppm)
137. State conv_dato() {
138.     lectura_voltaje = calcular_volt(val); //Calcula el valor
del voltaje
139.     lectura_resist = calcular_res(val,RL); //Calcula el valor
de la resistencia
140.     lectura_ppm =
calcular_ppm(lectura_resist,Ro,coef); //Calcula el valor de la
concentración

```

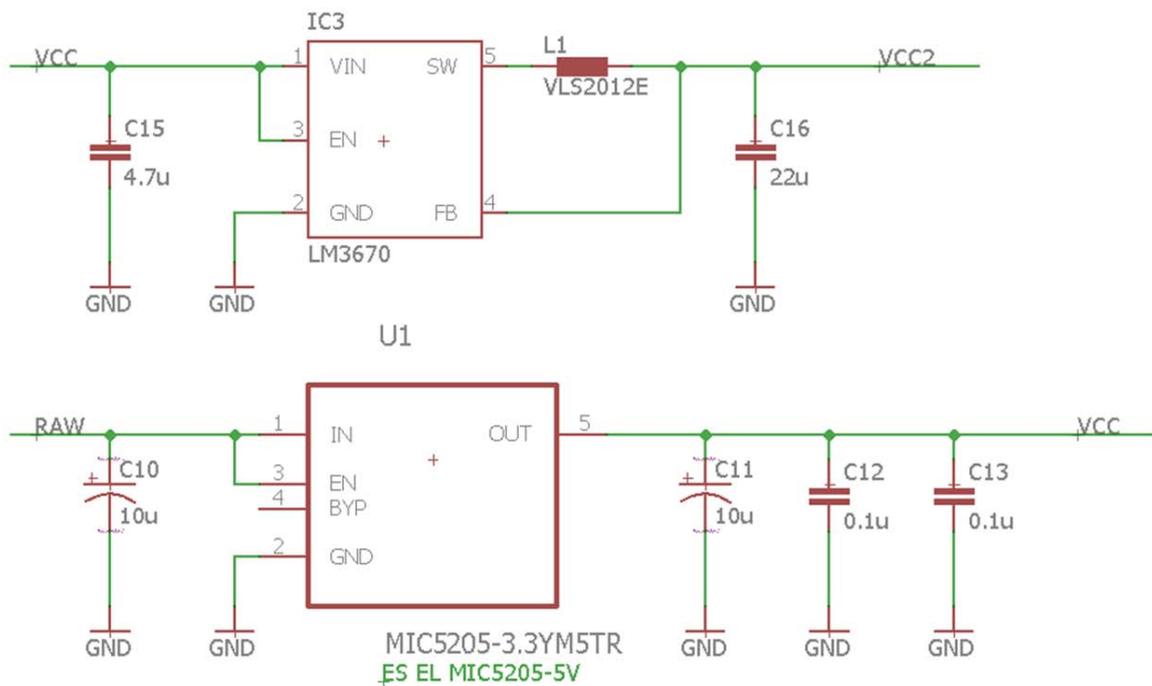
```
141.
142.     fin_SM_1 = 1;
143.
144. }
145.
146. //Envío de la lectura al módulo Bluetooth por el puerto serie
147. State enviar_lectura() {
148.     if(Serial.available() > 0) {
149.         Serial.println(lectura_ppm);
150.         fin_SM_2 = 1;
151.     }
152. }
153.
154. //Actuación sobre los LEDs en función de la lectura
155. State LED_verde() {
156.     for(int i = 0; i < 9; i++)
157.         if((i != 4) && (i != 5))
158.             leds.setPixelColor(i, 0x00, 0xFF, 0x00);           //COLOR
VERDE PURO (0xFF0000)
159.         leds.show();
160.
161.     fin_SM_3 = 1;
162. }
163.
164. State LED_rojo() {
165.
166.     for(int i = 0; i < 9; i++)
167.         if((i != 4) && (i != 5))
168.             leds.setPixelColor(i, 0xFF, 0x00, 0x00);           //COLOR
ROJO PURO (0xFF0000)
169.         leds.show();
170.
171.     fin_SM_3 = 1;
172. }
173.
174. //Estado de supervisión de las máquinas en AND
175. State synchro() {
176.     fin_SM_1 = 0;
177.     fin_SM_2 = 0;
178.     fin_SM_3 = 0;
179.
180.     DetectorStateChart.Finish();
181. }
```

ANEXO III:

PLANOS

ÍNDICE

1 PLANOS	3
1.1 ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA.....	3
1.2 CONEXIONADO DEL MICROCONTROLADOR.....	4
1.3 CONEXIONADO DEL MÓDULO BLUETOOTH.....	5
1.4 CONEXIONADO DEL SENSOR.....	6
1.5 CONEXIONADO DE LA MATRIZ DE LEDS.....	7
1.6 ESQUEMA GENERAL DE CONEXIONADO.....	8



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMATIZACIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL



TÍTULO DEL TFM:

DISEÑO DE DISPOSITIVO DETECTOR DE GASES EN ELECTRÓNICA FLEXIBLE PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

TÍTULO DEL PLANO:

ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

FECHA: MAYO 2017

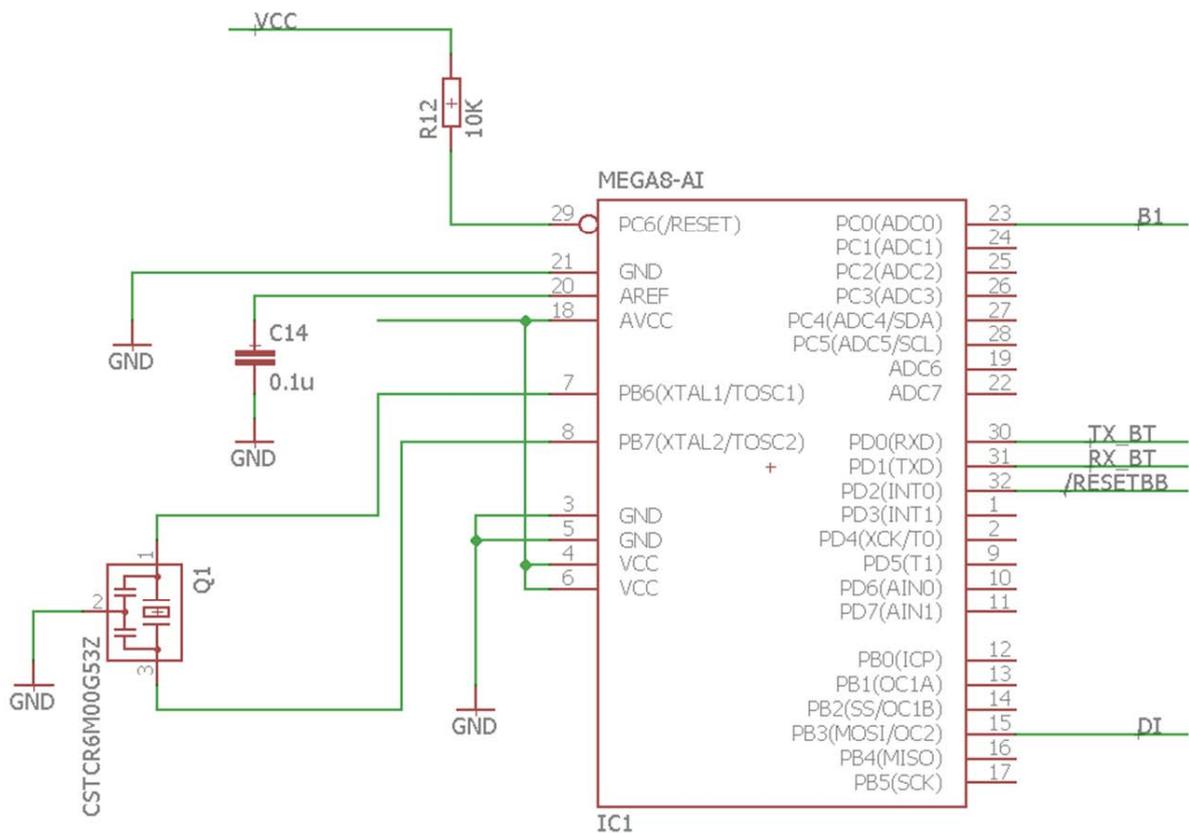
ESCALA: --

AUTOR:

NÉSTOR DE JUAN VÁZQUEZ

FIRMA:

PLANO Nº: 01



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMATIZACIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL



TÍTULO DEL TFM:

DISEÑO DE DISPOSITIVO DETECTOR DE GASES EN ELECTRÓNICA FLEXIBLE PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

TÍTULO DEL PLANO:

CONEXIONADO DEL MICROCONTROLADOR

FECHA: MAYO 2017

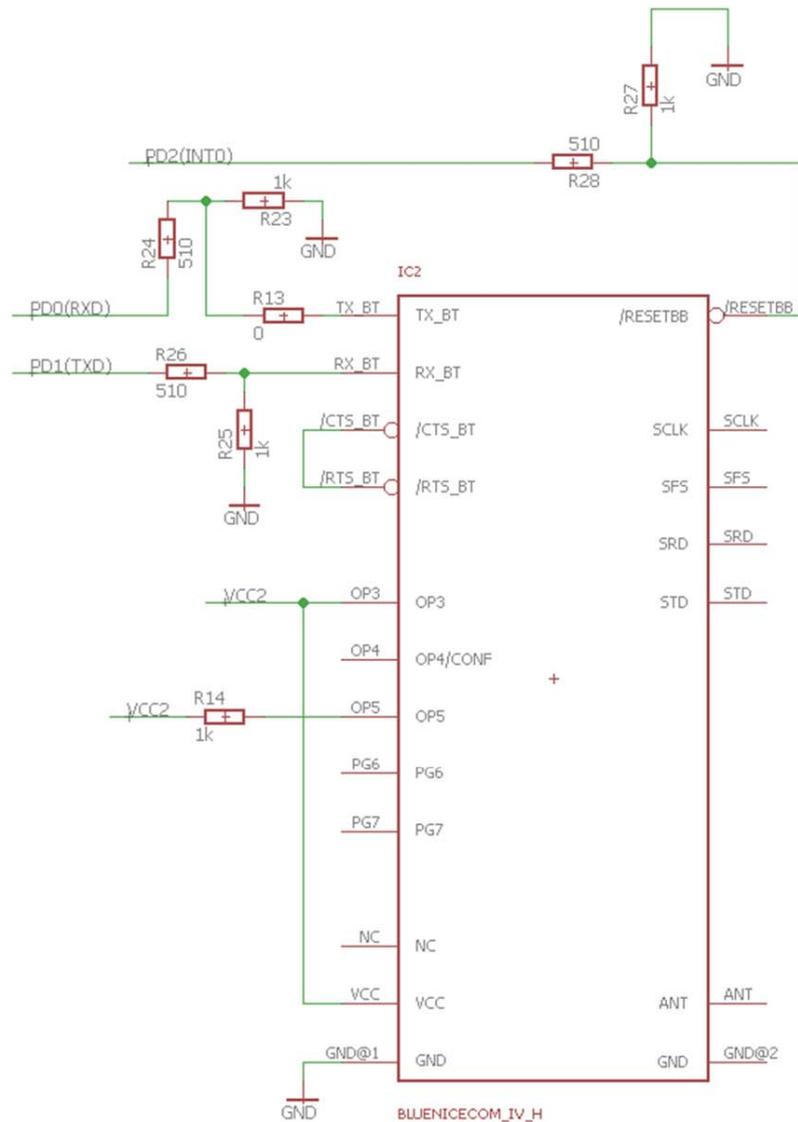
ESCALA: --

AUTOR:

NÉSTOR DE JUAN VÁZQUEZ

FIRMA:

PLANO Nº: 02



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMATIZACIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL



TÍTULO DEL TFM:

DISEÑO DE DISPOSITIVO DETECTOR DE GASES EN ELECTRÓNICA FLEXIBLE PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

TÍTULO DEL PLANO:

CONEXIONADO DEL MÓDULO BLUETOOTH

FECHA: MAYO 2017

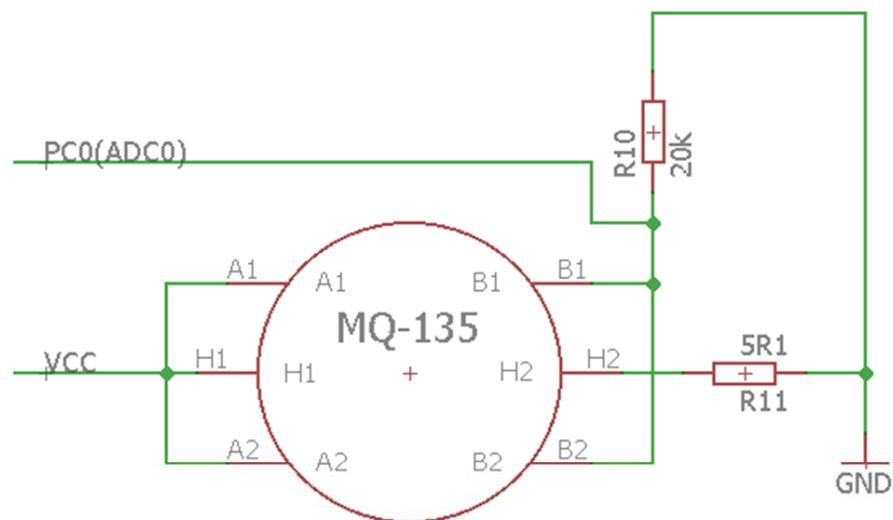
ESCALA: --

AUTOR:

NÉSTOR DE JUAN VÁZQUEZ

FIRMA:

PLANO N°: 03



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMATIZACIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL



TÍTULO DEL TFM:

DISEÑO DE DISPOSITIVO DETECTOR DE GASES EN ELECTRÓNICA FLEXIBLE PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

TÍTULO DEL PLANO:

CONEXIONADO DEL SENSOR

FECHA: MAYO 2017

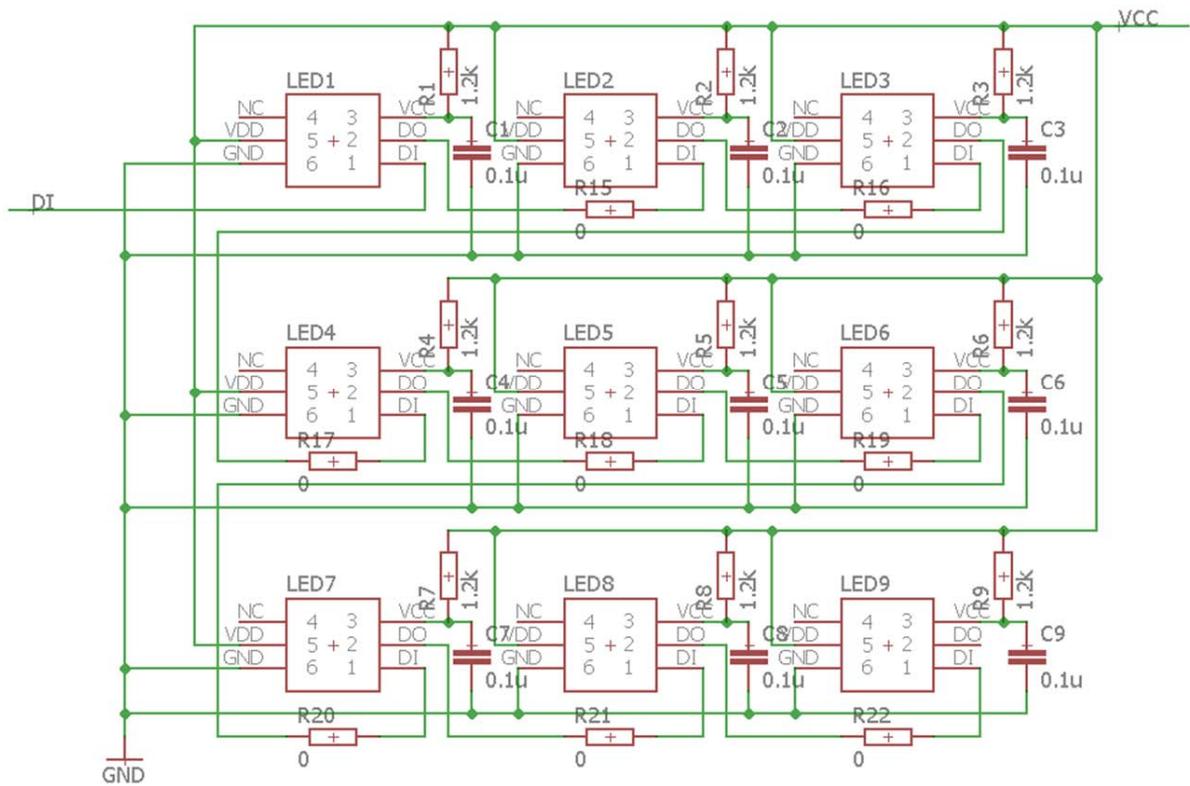
ESCALA: --

AUTOR:

NÉSTOR DE JUAN VÁZQUEZ

FIRMA:

PLANO N°: 04



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMATIZACIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL



TÍTULO DEL TFM:

DISEÑO DE DISPOSITIVO DETECTOR DE GASES EN ELECTRÓNICA FLEXIBLE PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

TÍTULO DEL PLANO:

CONEXIONADO DE LA MATRIZ DE LEDS

FECHA: MAYO 2017

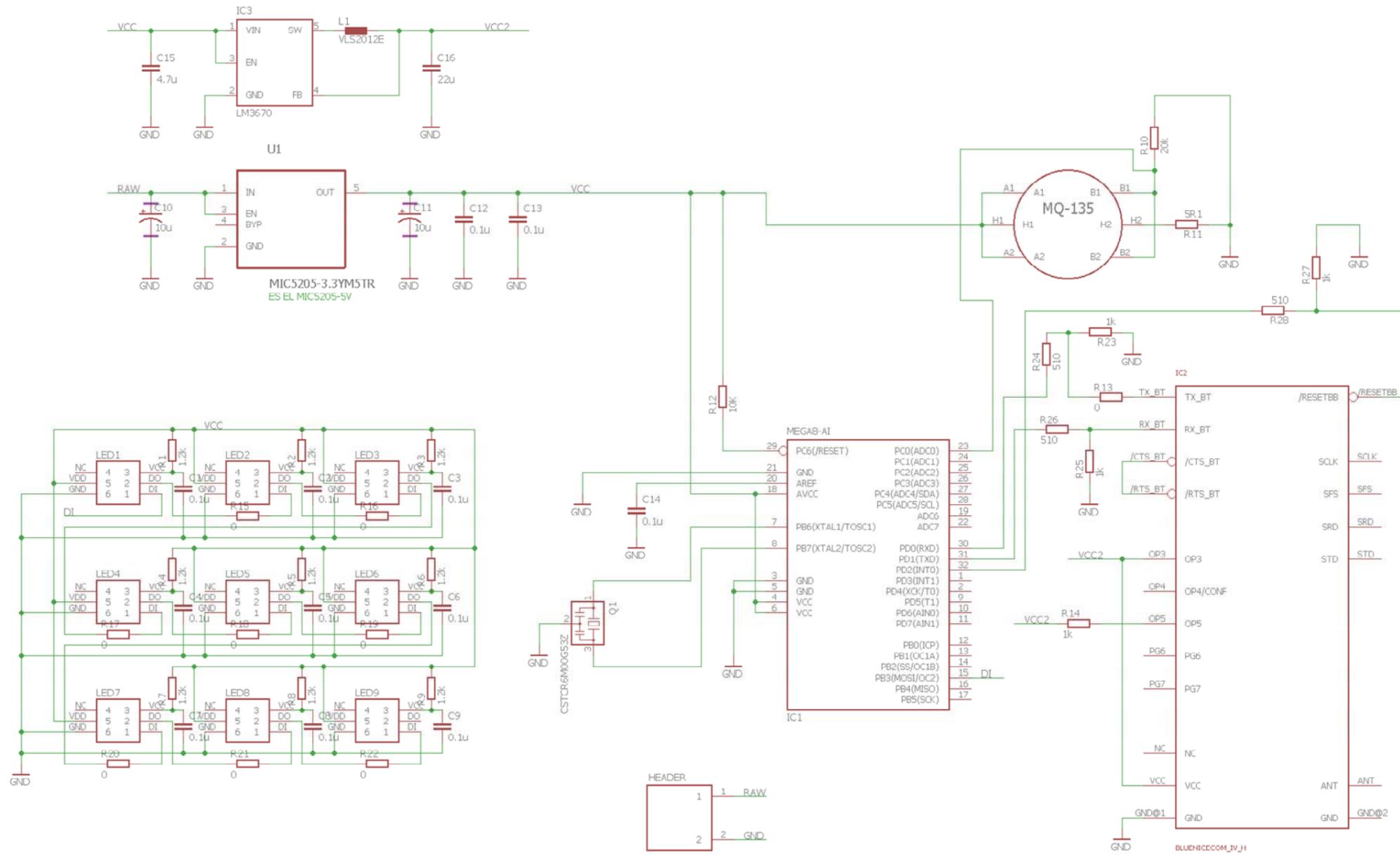
ESCALA: --

AUTOR:

NÉSTOR DE JUAN VÁZQUEZ

FIRMA:

PLANO N°: 05



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMATIZACIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL



TÍTULO DEL TFM:

DISEÑO DE DISPOSITIVO DETECTOR DE GASES EN ELECTRÓNICA FLEXIBLE PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

TÍTULO DEL PLANO:

ESQUEMA GENERAL DE CONEXIADO

FECHA: MAYO 2017

ESCALA: --

AUTOR:

NÉSTOR DE JUAN VÁZQUEZ

FIRMA:

PLANO Nº: 06

ANEXO IV:
TAREAS REALIZADAS

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	3
2	DESCRIPCIÓN	3
3	DIAGRAMA DE GANTT	4

1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente documento se describirá la planificación de tareas realizada para la realización del trabajo al que este anexo pertenece, así como un cronograma con la representación temporal de dichas tareas.

2 DESCRIPCIÓN

Las tareas que se realizaron para la consecución del trabajo realizado se describen a continuación en orden temporal desde el comienzo de su realización:

1. Diseño conceptual: comprende toda la fase de especificación de requerimientos funcionales y realización de los primeros diagramas de bloques que especifiquen las unidades que conformarán el dispositivo.
Tiempo de realización: 1 semana.
2. Diseño detallado: partiendo del diseño conceptual se llevará a cabo el diseño hardware en detalle, creando el diseño de la placa mediante CAD, así como el diseño del programa de control mediante máquina de estados.
Tiempo de realización: 2 semanas.
3. Programación: partiendo de la máquina de estados diseñada se programa el algoritmo de control que irá implementado en el dispositivo.
Tiempo de realización: 1 semana.
4. Implementación: tras finalizar el diseño, se imprímela placa diseñada según diversos métodos de electrónica flexible para disponer de diversas muestras. Tras elegir el método más adecuado y obtener una muestra de la calidad necesaria, se colocan los componentes sobre ella para obtener el prototipo final.
Tiempo de realización: 3 semanas.
5. Pruebas: tras obtener una muestra funcional, se realizarán pruebas sobre ésta para observar su respuesta ante distintos esfuerzos y fallos provocados.
Tiempo de realización: 1 semana.

3 DIAGRAMA DE GANTT

En este apartado se muestra un diagrama de Gantt de las tareas anteriormente realizadas para facilitar la visualización de su desarrollo temporal.

A continuación se muestra el diagrama en cuestión.

