



MÁSTER EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio de viabilidad para capnometría
portátil**

Autor: Daniel Goicoechea Artero

Director: José Daniel Muñoz Frías

Co-Director: Romano Gianetti

Madrid

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Daniel Goicoechea Artero

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Estudio de la viabilidad para capnometría portátil que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

- El autor se compromete a:
 - a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
 - b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
 - c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 10 de Julio de 2020

ACEPTA



Fdo.: Daniel Goicoechea Artero

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Estudio de viabilidad para capnometría portátil

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2019/20 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Daniel Goicoechea Artero

Fecha: 01/ 07/ 2020

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Daniel Muñoz Frías

Fecha: 1/7/2020

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Romano Giannetti

Fecha: 01/07/2020



GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio de viabilidad para capnometría
portátil**

Autor: Daniel Goicoechea Artero

Director: José Daniel Muñoz Frías

Co-Director: Romano Gianetti

Madrid

Estudio de viabilidad para capnometría portátil

Autor: Goicoechea, Daniel.

Director: José Daniel Muñoz Frías y Romano Gianetti.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas y SUMMA

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto consiste en el desarrollo de un capnógrafo, el cual es un aparato cuyo fin es representar en una gráfica una medida de CO₂, ya sea una concentración, una presión parcial, etc. El capnógrafo será usado en un ambiente de urgencias médicas, dónde se enviará vía Bluetooth las medidas a una Tablet.

Palabras clave: Capnógrafo, Bluetooth, Tablet

1. Introducción

Es una práctica habitual en el sector médico tener un constante seguimiento del CO₂ exhalado por un paciente. Una correcta capnografía puede llegar a ser una gran guía instantánea del nivel de CO₂ arterial, suministra información sobre el ritmo y la frecuencia respiratoria. [1] Esta técnica se utiliza bastante en urgencias y, actualmente, quieren evolucionar e instalar una tablet desde la que se lleve toda monitorización del paciente, por lo que hace falta actualizar la infraestructura.

2. Definición del proyecto

El proyecto consistirá en un capnógrafo que pueda ser utilizado en la ambulancia o helicóptero de urgencias y que envíe las medidas a la Tablet mediante Bluetooth.

3. Descripción del sistema

El sistema consiste en 2 partes principales:

- **Capnómetro:** irá pegado al paciente y su misión será extraer una muestra de la exhalación del paciente mediante una microbomba; medir la concentración de CO₂, transmitir la medida por Bluetooth al capnógrafo y controlar el caudal de la bomba.
- **Capnógrafo:** consiste en una aplicación de móvil que mostrará en un gráfico los datos recibidos.

4. Resultados

Microbomba

Se ha utilizado una microbomba BLZ-220V de la marca TCS Micropumps, la cual puede llegar forzar caudales de entre 30 y 220 ml/min. Esta microbomba consta de 3 señales, un PWM, un encoder y una señal para cambiar el sentido de giro.

Sensor de CO₂

El capnómetro utilizado es el SprintIR-6S de la marca GSS (Gas Sensing Solutions). Utiliza la tecnología NDIR para detectar la concentración de gases, en este caso CO₂. Esta técnica consiste en comunicar dos LEDs, un emisor y un receptor, con una longitud de onda igual a la del elemento o molécula que se quiera medir, así la presencia de este gas reducirá la intensidad de la comunicación entre los LEDs. Este sensor llega a enviar por UART 50 medidas por segundo, suficiente para dar una imagen detallada de la exhalación del paciente.

Módulo Bluetooth

El módulo utilizado es el HC-05 que envía información a 3 Mbps, encargado de la comunicación entre el capnómetro y capnógrafo.

Capnómetro

Se ha utilizado una tarjeta de desarrollo de ICAI en la que está el microcontrolador sobre la que se ha instalado un shield que cuenta con los periféricos del capnómetro: la microbomba, el sensor y el módulo Bluetooth (Ilustración 1).

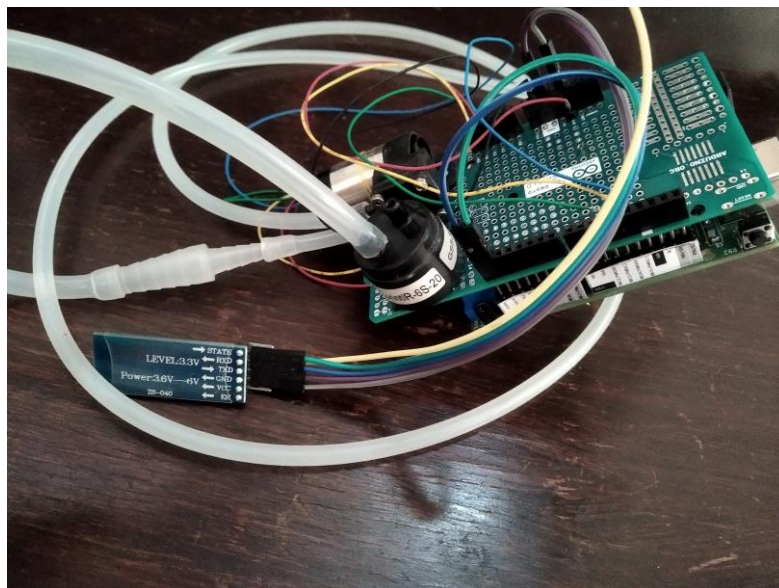


Ilustración 1 Capnómetro

El microcontrolador contará con un bucle scan de 1 milisegundo, en el que leerá los mensajes del sensor e irá enviándolos al capnógrafo. Además, leerá el encoder de la microbomba y calculará la velocidad angular de esta. La frecuencia mínima de muestreo del encoder es 800 Hz, por lo que 1 ms será suficiente para muestrear esta señal con éxito. Una vez el microcontrolador tenga esta medida podrá realizar un control PI manejando la señal PWM de la microbomba para conseguir la frecuencia de giro de referencia requerida (Ilustración 2).

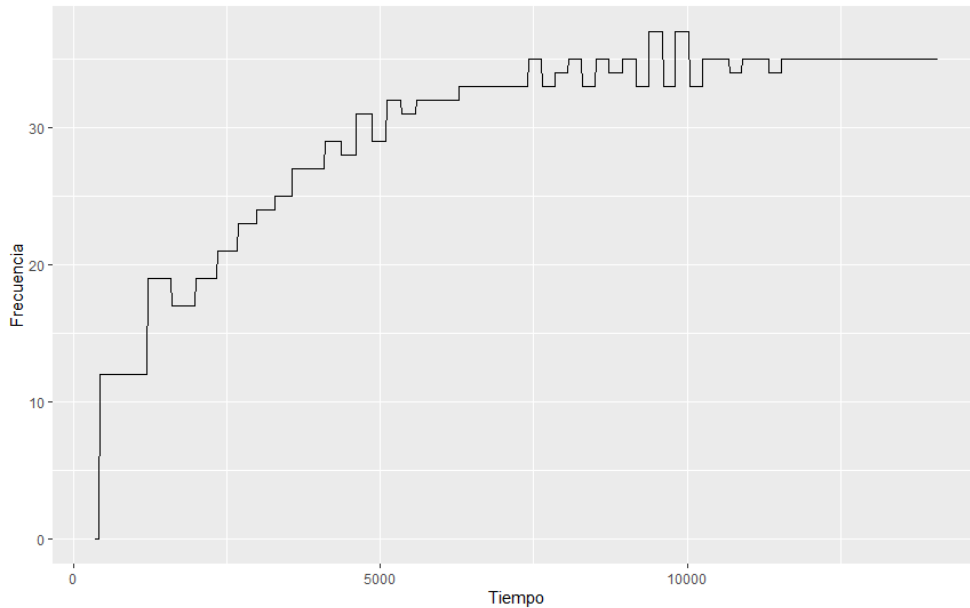


Ilustración 2 Control de frecuencia con referencia en 35 Hz

Capnógrafo

El capnógrafo se ha desarrollado mediante la página web AppInventor, una herramienta creada por el MIT, que permite poder programar aplicaciones con programación por bloques. Esta aplicación permitirá conectarse al capnómetro y mostrar en una gráfica los datos recibidos. También contará con un display donde se mostrará el valor actual del dato recibido.

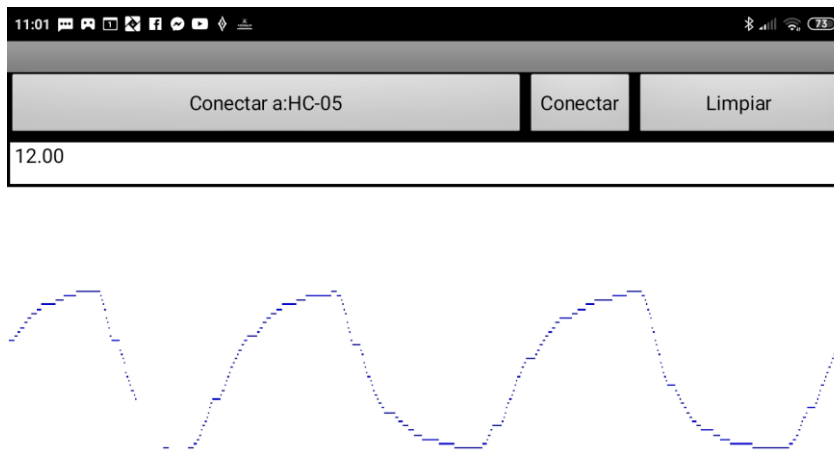


Ilustración 3 Capnografía

5. Referencias

- [1] E. hospital, «<http://www.elhospital.com/temas/Utilidad-actual-de-la-capnografia+8061150>,» [En línea].

Portable capnometry viability research

Author: Goicoechea, Daniel.

Director: José Daniel Muñoz Frías y Romano Gianetti.

Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas and SUMMA

ABSTRACT

This project consists in the development of a portable capnograph which is a device that is able to graph CO₂ concentrations. The capnograph is often used in medical issues in order to measure a patient's exhalation. The capnograph will be used in an ambulance where its measures will be sent via Bluetooth to a Tablet.

Keywords: Capnograph, Bluetooth, Tablet

1. Introduction

It is common in medical issues to have the CO₂ levels in a patient's exhalation constantly monitored. A correct capnography could result in a great guide of the instantaneous arterial CO₂ pressure. Also, it can give information about breathing frequency and rhythm. [1] Capnographs are often used in ambulances, and currently, a tablet which is wirelessly connected to all sensors is being installed in them, instead of having a display per sensor.

2. Project definition

The project will consist in the development of a portable capnograph that can be used in an ambulance or a helicopter, both related with medical urgencies.

3. System description

The system will have two principal parts:

- **Capnometer:** it will be attached to the patient and will be in charge of taking samples of the patient's exhalation with a pump, measuring the CO₂ in the sample, sending it to the tablet and controlling the flow of the pump.
- **Capnograph:** it consists in an application for the tablet which will graph the measures received.

4. Results

Micropump

The micropump used has been the BLZ-220V from TCS Micropumps, which can manage flows between 30 and 220 ml/min. This micropump has 3 signals, a PWM, an encoder and a signal to change the sense of rotation.

CO₂ sensor

The capnometer used is the SprintIR-6S from GSS (Gas Sensing Solutions). It is equipped with IR LEDs in order to use the NDIR technique to detect the concentration of a gas, CO₂ in this case. This technique consists in communicating two LEDs, an emitter and a receiver, with a wavelength equal to the one of the element or molecule that will be measured. Thus, the presence of the gas will reduce the intensity of the communication between the LEDs. This sensor communicates with UART protocol and can reach up to 50 measurements per second, enough to give a detailed image of the patient's breathing

Bluetooth module

The module used is the HC-05 which can send information at 3 Mbps, it is in charge of the communication between the capnometer and the capnograph and it works with UART protocol.

Capnometer

It has been used the development board of ICAI for the microcontroller where a shield has been installed. This shield has all the peripherals that the capnometer needs: the micropump, the sensor and the bluetooth module (Illustration 1).

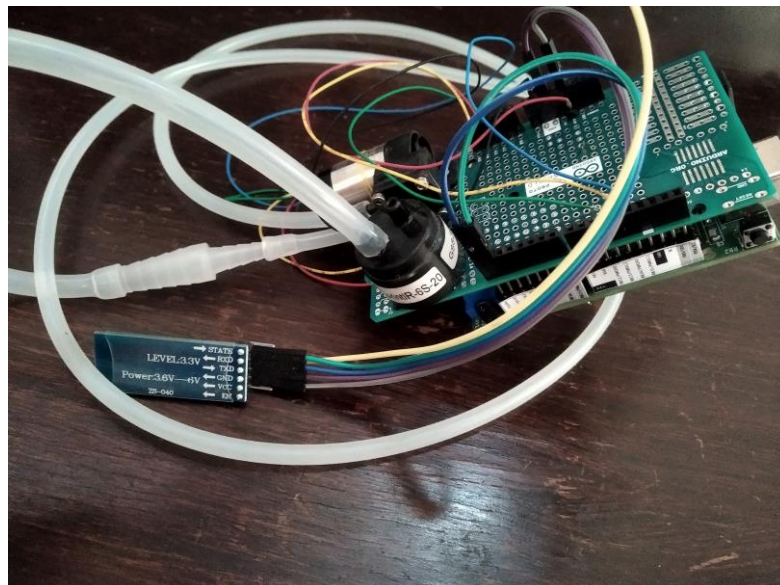


Illustration 1 Capnometer

The microcontroller is programmed with a scan loop that has a duration of 1 millisecond. In this time it will read the measures from the sensor and send them instantly to the capnograph. In addition, it will read the pump's encoder and calculate its angular speed. The minimum sampling frequency is 800 Hz. Therefore, the scan loop duration will be

enough to read the encoder correctly. Once its frequency is calculated the microcontroller will execute a PI control to get the required frequency (Illustration 2).

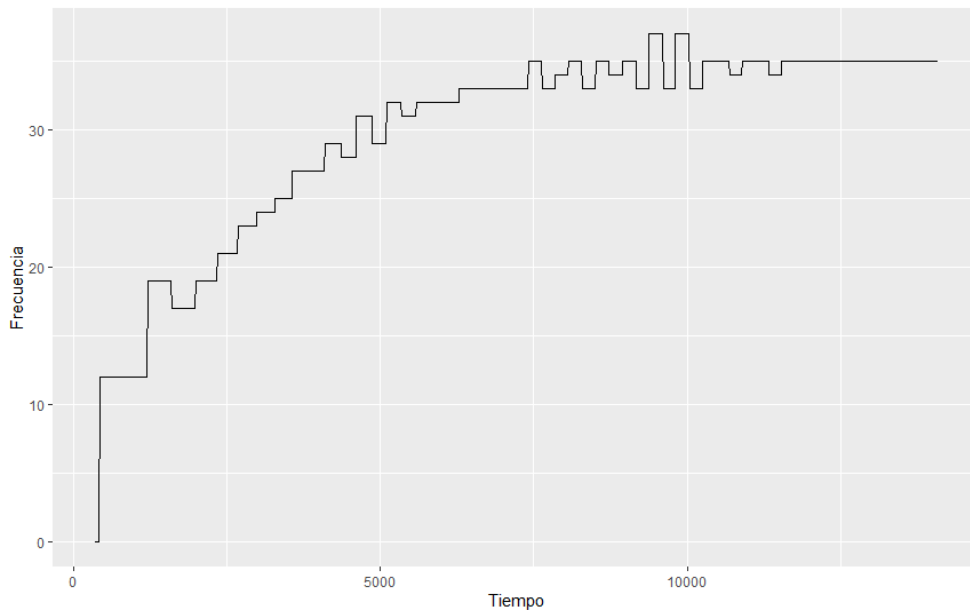


Illustration 2 Frequency control with a reference of 35 Hz

Capnograph

The application has been developed with AppInventor, a web IDE created by the MIT. It will be able to connect to the capnometer and graph the received measures. It will also be able to show in a display the last value received.

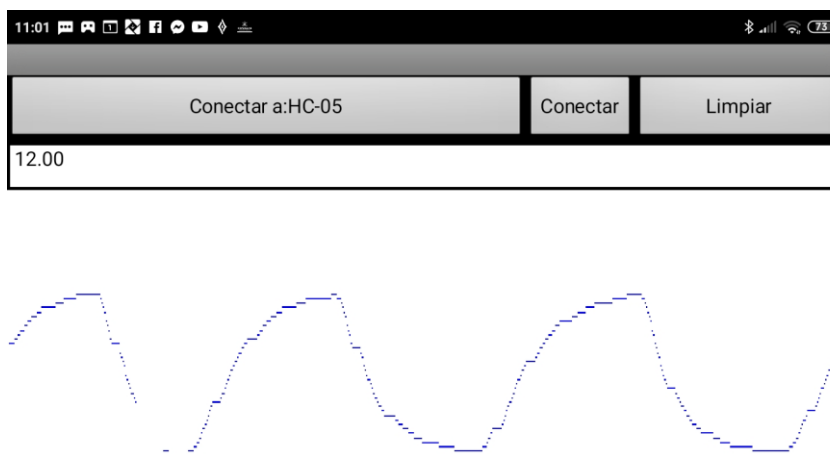


Illustration 3 Capnograph

5. References

- [1] E. hospital, «<http://www.elhospital.com/temas/Utilidad-actual-de-la-capnografia+8061150>,» [En línea].

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	5
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	6
Capnografía.....	6
Bomba de membrana o diafragma	6
PWM (Pulse Width Modulation)	6
Encoder	7
UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)	8
Microcontrolador dsPIC.....	8
Capítulo 3. Estado de la cuestión.....	9
Medida de CO ₂	9
Tipos de capnómetro y características	12
Tipos de capnometría.....	14
Mercado	15
Capítulo 4. Definición del Trabajo	18
Justificación	18
Objetivos.....	18
Organigrama	20
Estudio económico.....	20
Objetivos de desarrollo sostenible	22
Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....	24
Capnómetro.....	25
Diseño.....	25
Control de velocidad	30
Implementación	31
Capnógrafo.....	34
Diseño.....	34
Capítulo 6. Solución desarrollada.....	36
Capnómetro.....	36

<i>Control de velocidad de giro</i>	37
Capnógrafo.....	41
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros	43
Capítulo 8. Bibliografía	44

Índice de figuras

Figura 1 Funcionamiento del PWM [3].....	7
Figura 2 Longitud de onda absorbida según la molécula	9
Figura 3 Detección de CO ₂ mediante un flujo a través de un tubo	10
Figura 4 Detección de CO ₂ por difusión	11
Figura 5 Sensor con método de difusión	13
Figura 6 Main Stream (izquierda) vs Side Stream (derecha)	14
Figura 7 Diseño del sistema.....	24
Figura 8 Sensor de CO ₂ SprintIR-R.....	26
Figura 9 Tiempo de respuesta frente a caudal	26
Figura 10 Microbomba 220 BLZ	28
Figura 11 Módulo HC-05	29
Figura 12 Control en lazo cerrado de la velocidad de giro de la bomba	31
Figura 13 Diagrama periféricos capnómetro	32
Figura 14 Capnómetro resultado final	36
Figura 15 Caracterización bomba.....	37
Figura 16 Ensayo de arranque de la bomba-Mando	38
Figura 17 Ensayo de arranque de la bomba -Frecuencia.....	39
Figura 18 Ensayo de obstrucción en lazo abierto- Frecuencia	39
Figura 19 Ensayo obstrucción lazo cerrado- Frecuencia.....	40
Figura 20 Ensayo obstrucción lazo cerrado- Mando	41
Figura 21 Capnografía realizada con la aplicación	42

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación entre difusión y flujo a través de cámara	13
Tabla 2 Capnógrafos en el mercado [4].....	17
Tabla 3 Organigrama	20
Tabla 4 Costes de los componentes	20
Tabla 5 Costes de las herramientas y equipos	21
Tabla 6 Costes de software	21
Tabla 7 Costes de mano de obra.....	21
Tabla 8 Costes generales	22
Tabla 9 Interfaz del SprintIR	27

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La capnometría (griego: kapnos, “humos”), es decir, la medición del CO₂, se viene usando desde hace ya años en el ámbito médico, con el objetivo de conocer la presión relativa que ejerce este gas al ser exhalado. Una vez se conoce este dato, se puede saber si el sujeto tratado está respirando correctamente. Hay múltiples aplicaciones, por ejemplo, en una RCP (Reanimación cardiopulmonar) resulta útil conocer este dato en tiempo real, ya que ayuda al que ejerce la RCP a hacerla correctamente. También, es un dato importante durante una ventilación mecánica de un paciente intubado, evitando así problemas de hipoventilación o hiperventilación. La capnometría en sí, fuera del ámbito médico, por ejemplo, en relación a la contaminación, no supone un gran reto, ya que se puede estar midiendo el CO₂ en un lugar en concreto, la cual se hará cada cierto tiempo en un orden de minutos, ya que no necesita una respuesta rápida si no precisa. El problema surge al hacer la capnometría dentro del sector médico. Este sector necesita no solo rapidez, si no también precisión. Hay que tener en cuenta que, como se comentó al inicio de esta introducción, es una medida que se utiliza para saber si un paciente está respirando correctamente, y un diagnóstico erróneo podría conllevar graves consecuencias.

Actualmente, se lleva un tubo desde el paciente hasta el capnógrafo. Esto puede resultar bastante molesto para los enfermeros durante una urgencia. Es por esto que las ambulancias están incorporando una Tablet que reciba las medidas de todos los sensores de manera inalámbrica.

En conclusión, una capnografía puede resultar de gran utilidad a la hora de diagnosticar correctamente a un paciente y se necesita que el diagnóstico sea preciso y rápido. A pesar, de que sea un sector muy trabajado, los hospitales están actualizando sus equipos en las ambulancias. Es por esto que, actualmente, las ambulancias necesitan una actualización en sus equipos.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En este capítulo se describirán las tecnologías y protocolos que se vayan a tratar durante el proyecto para facilitar su lectura y comprensión.

CAPNOGRAFÍA

La capnografía consiste en la monitorización no invasiva complementaria a la pulsioximetría, la cual mide la oxigenación, donde la capnografía medirá el dióxido de carbono. Es una técnica que se emplea desde hace más de 30 años. [2] Será vital en este proyecto diferenciar entre el capnógrafo y el capnómetro. El primero se corresponde a un aplicación donde se realizará una gráfica de la concentración del CO₂. El capnómetro es el encargado de medir el CO₂ y enviar esta medida al microcontrolador mediante el protocolo UART por Bluetooth.

BOMBA DE MEMBRANA O DIAFRAGMA

También llamada microbomba debido a que mueve caudales muy pequeños. Este tipo de bomba será utilizada para extraer la exhalación del paciente. Esta contiene una membrana de la cual se tira y empuja para mover fluidos. Cuenta con un sistema compuesto por un cigüeñal y una biela que son los encargados de mover el diafragma. Pueden ser neumáticas o eléctricas y en este caso será eléctrica, lo que permite variar la velocidad de giro del cigüeñal, mediante PWM, y así, bombear el fluido con un caudal mayor.

PWM (PULSE WIDTH MODULATION)

La modulación del ancho de pulso es una técnica comúnmente usada en la electrónica que tiene como objetivo variar la el voltaje medio de una señal. Muchos elementos varían su comportamiento según el voltaje que les llegue, por ejemplo, un LED

se iluminará con más intensidad cuanto mayor sea el voltaje o en nuestro caso, una bomba girará más rápido cuanto mayor sea su voltaje. Esta técnica se podría decir que consiste en apagar y encender muy rápido la alimentación (Figura 1 Funcionamiento del PWM), es decir, si tienes un LED alimentado, lo mantienes un 60% del tiempo el LED encendido y 40% apagado, la intensidad luminosa que dará será un 60% de la que daría si estuviese un 100% del tiempo encendido. Obviamente, estos cambios de estado tienen que ser a una frecuencia mayor que la frecuencia a la que el ojo humano ve, en caso contrario, simplemente se vería un LED parpadeando. El porcentaje del periodo en el cual el LED estará encendido se denomina ciclo de trabajo.

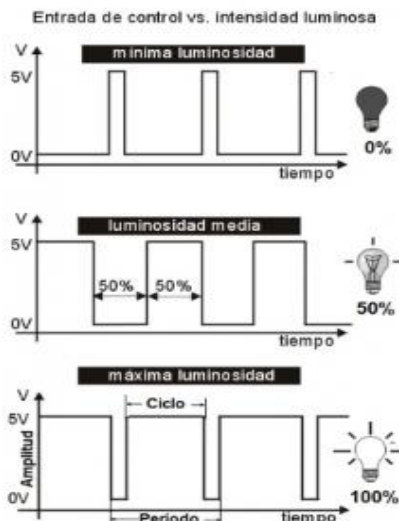


Figura 1 Funcionamiento del PWM [3]

ENCODER

La idea más básica de un encoder consiste en tener dos discos, uno fijo y otro que gire. Uno de ellos tendrá un LED y el otro tendrá un receptor de luz. Esto permite ver cuando ha pasado el LED por la misma posición y así, por ejemplo, poder contar el tiempo que ha tardado en dar una vuelta. Ahora, esto es una idea básica, hay encoders de toda índole, que llegan a ser utilizados para grabar memoria en discos.

UART (UNIVERSAL ASYNCHRONOUS RECEIVER-TRANSMITTER)

Este es un protocolo de comunicación que permite comunicar dos dispositivos, de manera asíncrona y en serie, mediante 2 señales, una de transmisión (Tx) y otra de recepción (Rx). Una comunicación asíncrona es aquella que no necesita un cable de más que lleve los pulsos de reloj que sincroniza los actos de los sistemas envueltos en la comunicación. Una comunicación serie es aquella que envía todos los datos en un cable, lo contrario es una comunicación en paralelo, que necesita un cable por bit. Este protocolo da entre 9600 y 250.000 baudios (bits/segundo).

MICROCONTROLADOR DSPIC

Características principales:

- Condiciones de operación [3-6] V
- 16 bits
- 40 MIPS (megainstructions per second)
- 10/12-bit ADC a 1,1 Msps/500ksps
- 5 timers de 16 bits con posibilidad de combinarlos para formar timers de 32 bits
- 2 módulos UART

Se contará con una tarjeta de desarrollo creada por ICAI para poder ejecutar programas en el microcontrolador, la cual cuenta con LEDs, pulsadores, y todos los condensadores de desacople.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

MEDIDA DE CO₂

Actualmente, la técnica más utilizada a la hora de medir la concentración de un gas es mediante rayos infrarrojos, también conocida como NDIR (Non Dispersive Infrared Detector). Esta es una técnica electroscópica de absorción, es decir, se centra en medir la absorción de un tipo de radiación dependiendo de la longitud de onda. Cada tipo de molécula es capaz de absorber unas ciertas longitudes de onda u otras en función de los elementos que las compongan y la forma en la que estén dispuestos, ya que esto variará lo que se conoce como la energía vibracional de esta molécula. Como se puede observar en la Figura 2, las longitudes de onda asociadas al CO₂ son 4.25 μm , 2.7 μm y 13 μm . Por lo tanto, siempre que se disparen fotones con una de esas longitudes de onda, estos serán absorbidos en función de la concentración del CO₂.

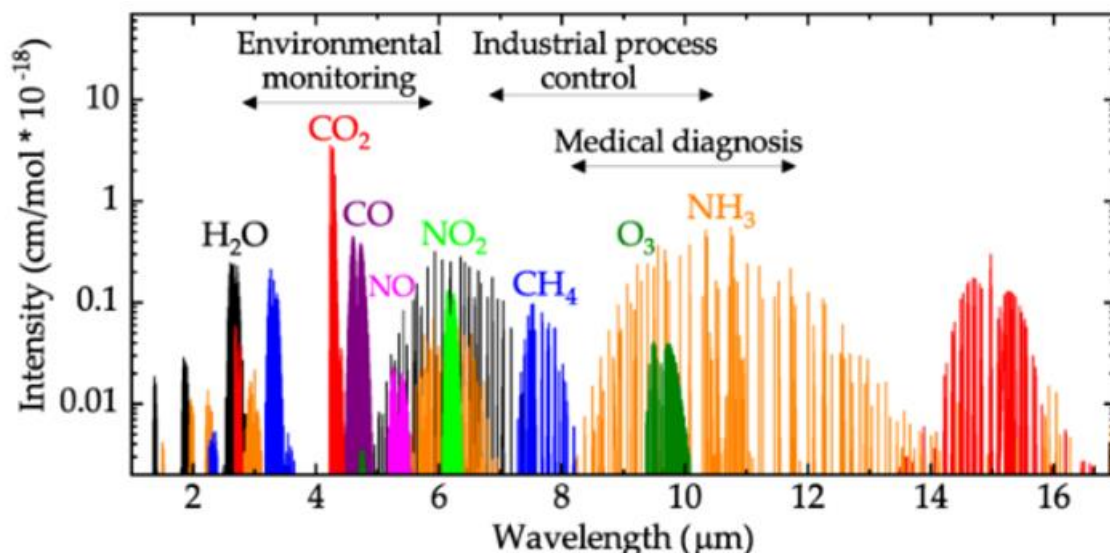


Figura 2 Longitud de onda absorbida según la molécula

En este método de medida, Figura 3, se utilizan dos diodos LEDs que se comunican, uno con el papel de emisor y otro de receptor. Estos LEDs también tienen una longitud de

onda asociada, es decir, sólo serán capaces de emitir y recibir esta. El receptor funcionará como una fuente de corriente, así que, cuando este esté recibiendo ondas que le activen, alimentará un circuito proporcionalmente a la cantidad de fotones que le lleguen. Con esta idea se puede concluir, que cuando se usen unos LEDs con una de las longitudes de onda del CO_2 , cuando pase este gas, absorberá un porcentaje de fotones y la corriente emitida por el diodo receptor será menor. La anterior afirmación proviene de la ley de “Beer”, la cual estipula que la cantidad de rayos infrarrojos absorbida es directamente proporcional a la concentración de la sustancia que absorba estos rayos.

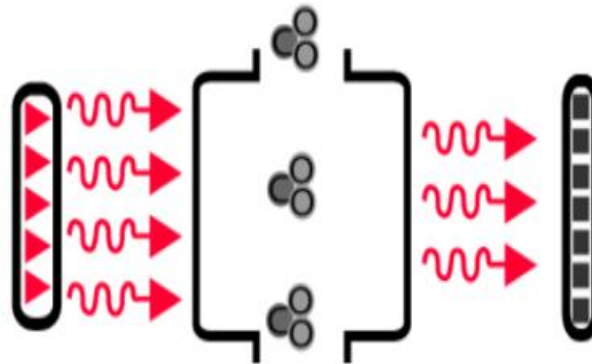


Figura 3 Detección de CO_2 mediante un flujo a través de un tubo

Con la correspondiente calibración y un modelo que represente la corriente emitida en función de la concentración de CO_2 , se podrá saber en todo momento la concentración de este gas. Cabe destacar que para este método el gas tiene que seguir un flujo a través de un tubo para terminar dónde estén los LEDs. Otra manera de medir el CO_2 , sería por un método llamado difusión, Figura 4, en el que tanto el LED emisor como el receptor apuntan en la misma dirección, en la que hay una placa metálica que refleja los fotones. Entonces, se espera que los fotones reflejados alimenten al receptor. De hecho, este es el método que se suele utilizar en al medir la concentración de CO_2 .



Figura 4 Detección de CO₂ por difusión

Uno de los grandes problemas que suelen surgir a la hora de detectar un gas mediante NDIRs son las interferencias. Las tres principales interferencias son la luz ambiente, otros tipos de moléculas que tengan la misma longitud de onda y otros gases en la mezcla.

- En la luz ambiente se pueden hallar fotones con muchos tipos de longitud de onda, por lo tanto, aunque el emisor no esté luciendo, el receptor estará algo activo. La manera de resolver esto es mediante luz pulsada. Lo que se hace es activar el emisor con un período. Así, se tendrán dos medidas, una en la parte alta de la onda, en la que se medirá el CO₂ más la luz ambiente, y otra en la parte baja, en la cual se medirá solo la luz ambiente. La diferencia de ambas será la medida del CO₂.
- En el caso de que haya un gas en la mezcla, que absorba la misma longitud de onda, no se podrá conocer con exactitud, cuantos de los fotones que no ha absorbido el receptor, han sido absorbidos por un gas o por otro de la mezcla. Por lo tanto, se suelen separar ambos gases para poder analizarlos por separado, aunque esto no siempre es una opción posible, ya que variará la concentración del gas a medir.
- La presencia de otro gas, aunque no tenga la misma longitud de onda, generará colisiones entre moléculas, variando así la energía vibracional de estas. Por lo tanto, esto hará que se agrande el ancho de las longitudes de onda absorbidas de

los gases afectados por las colisiones, y generando, como consecuencia un error en la medida. Como en los otros casos, esto se puede arreglar mediante una calibración en la que no haya CO₂, para luego restárselo al gas mezcla. Sin embargo, esto solo generará un poco de ruido y no supondrá un grandísimo error.

Como conclusión, tras haber comprendido el funcionamiento de un sensor NDIR se comprueba que lo más lógico sería usar LEDs de 4.25 μm , ya que teniendo en cuenta que se medirá cerca de una persona respirando y posiblemente tosiendo, posiblemente, sea un ambiente ciertamente húmedo. Como mucho aparecerán ciertas interferencias debidas al nitrógeno y al oxígeno exhalado. Aunque como ya se explicó este error puede ser calibrado y ciertamente eliminado de la medida.

TIPOS DE CAPNÓMETRO Y CARACTERÍSTICAS

En este apartado se profundizará en los dos principales tipos de capnómetro que existen, las diferencias que existen entre ellos y las principales características de un capnómetro.

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, actualmente, la técnica más generalizada para la medición del CO₂ se hace mediante IR y existen dos técnicas: por difusión y por un flujo que pasa por una cámara. La principal diferencia entre estos dos tipos de sensores es la velocidad de muestreo y los rangos de concentraciones que pueden medir. Un sensor que funciona por difusión, Figura 5, tiene que esperar a que la muestra a analizar pase por el filtro que tiene, esto implica que tiene que esperar un tiempo hasta que se haya estabilizado el contenido dentro de la cámara. La gran ventaja de este método es que por el filtro prácticamente solo pasará CO₂, lo que lleva a poder analizar concentraciones mucho menores debido a que no habrá ruido producido por otros elementos y, además, no tendrá un caudal, aunque esto les impide llegar a medir concentraciones grandes, debido a equilibrios de presión dentro y fuera de la cámara.



Figura 5 Sensor con método de difusión

Por otro lado, los sensores que trabajan llevando un flujo a través de una cámara cuentan con un caudal, es decir, no tienen tiempo para analizar detalladamente la muestra, así que tendrán precisiones menores. Sin embargo, al no ser detallistas son bastante más rápidos. A parte, no cuentan con ningún filtro. Les costará más medir concentraciones pequeñas, pero a cambio pueden medir concentraciones del 100%.

A continuación, en la Tabla 1, se muestra una comparativa general entre ambos métodos.

	Difusión	Flujo a través de una cámara
Concentración máx. medible	30%	100%
Precisión	30 ppm 3% del valor medido	(*) 70/300 ppm 5% del valor medido
Velocidad de muestreo	2 seg.- 5 min. por medida	2-50 lecturas por segundo

Tabla 1 Comparación entre difusión y flujo a través de cámara

(*) 70 ppm corresponde a un sensor de concentración máxima del 20% y 300 ppm a uno del 100%.

En conclusión, se puede deducir rápidamente que los sensores de difusión no pueden ser utilizados en el ámbito médico debido a su tiempo de muestreo. Además, la concentración dentro de la máscara de un paciente puede llegar fácilmente al 60%, esto implica que los capnómetros utilizados en el sector médico tienen que ser del 100%, que son los que tienen la peor precisión.

TIPOS DE CAPNOMETRÍA

Existen dos maneras de hacer una capnometría, “Main Stream” y “Side Stream”, en las que, respectivamente, se medirá directamente en el flujo exhalado por el paciente o se tomará una muestra de este flujo, la cual se aspirará mediante una bomba y se analizará independientemente. El hecho de escoger una u otra puede llegar a variar muchos factores desde el tiempo de respuesta hasta llegar a suponer un riesgo para el paciente.

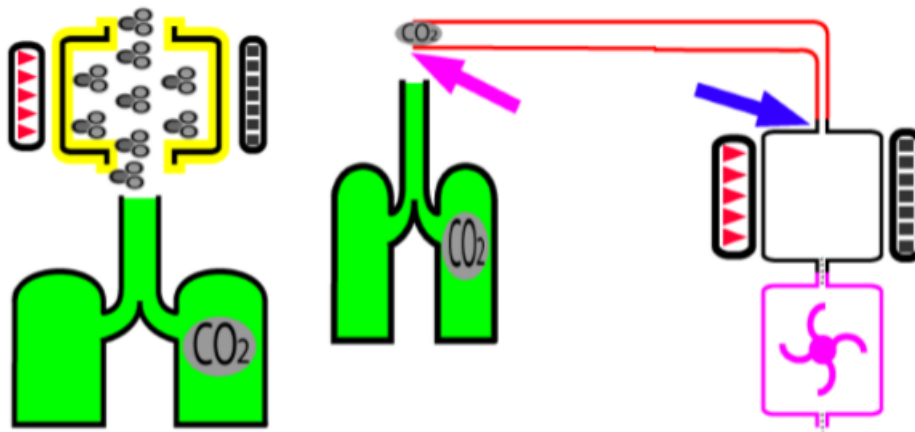


Figura 6 Main Stream (izquierda) vs Side Stream (derecha)

Antes de poder comparar estas dos técnicas correctamente es preciso conocer en detalle la definición del tiempo de respuesta. Dicho tiempo será la suma del tiempo que tarde en

llegar el aire al sensor, más el tiempo que tarde en “llenarse” el sensor. Hay que tener en cuenta que, en función de la velocidad del fluido, la señal eléctrica podría llegar antes al valor requerido. En caso contrario, la señal presentaría una rampa, lo cual podría llevar a concluir un diagnóstico erróneo.

Una vez ya se ha entendido correctamente lo que supone el tiempo de respuesta, se puede entender que en un Main Stream, el aire tardará poco en llegar al sensor, puesto que está cerca de la boca del paciente. Sin embargo, tardará algo de tiempo en “llenarse” el sensor, debido a que el caudal será el exhalado por el paciente, quien puede ser que no tenga fuerza para soplar, y no hay manera de remediar este problema. Además, la variación de caudal hace que la forma de la capnografía también varíe.

En cuanto al uso de un Side Stream, supondrá que el aire tardará un rato en llegar hasta el sensor, pero como la velocidad del aire será alta, no tardará en llenarse el sensor. De todas formas, mediante una bomba y haciendo que el tubo que llega hasta el sensor sea más fino se puede conseguir reducir significativamente este tiempo. Aunque estos remedios pueden llegar a suponer un problema mayor si no se tratan con delicadeza, y es que, si la bomba aspira con demasiada fuerza, puede dar problemas de respiración al paciente en caso de que este tenga dificultades para respirar, como un neonato o en la pediatría en general. Otro suceso que puede llegar a ocurrir, es que, como se utilizan tubos más finos en el Side Stream para aumentar la velocidad del líquido, puede ocurrir que se obstruya el tubo debido a la acumulación de humedad, esto por ejemplo no ocurre en el Main Stream al ser un tubo más gordo. Además, la presencia de agua puede suponer también una interferencia a la hora de medir y el Main stream no se puede llegar a librar de este problema. De todas formas, esto puede llegar a evitarse poniendo trampas de agua o filtros, o en el caso del Main Stream, se puede calentar el sensor mediante corriente eléctrica.

MERCADO

Actualmente, los capnógrafos se venden como pantallas que funcionan por separado ya sea mainstream o sidestream, es decir, se encuentra una máquina entera que muestra la

capnografía, y normalmente, también se muestra la pulsioximetría, ya que son complementarias. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los capnógrafos que se encuentran en el mercado:

Módulo	Tipo	Precio (€)	Comentarios
HANDLEHELD MOD. PC-900B	Sidestream	2178	Incluye capnógrafo y pulsioxímetro. Pantalla TFT de 3,5” Capacidad de almacenamiento de hasta 24 horas, con USB para exportar a PC Batería de 10 horas Caudal de extracción: 50-150 ml/min
NONIN RespSense II	Sidestream	3127,85	Incluye capnógrafo y pulsioxímetro. Display con pantalla táctil Capacidad de almacenamiento de hasta 1,5 horas, con USB para exportar a PC Batería de 5 horas Caudal de extracción: 50-150 ml/min
SIBELMED CAP 10	Sidestream	4827,90	Solo incluye capnografía Pantalla TFT Capacidad de almacenamiento de hasta 1000 horas, con USB para exportar a PC Incluye un Software Caudal de extracción: 50-150 ml/min
EMMA	Mainstream	1802,90	Incluye capnógrafo (pequeña pantalla TFT), a pesar de ser mainstream Batería de 10 horas

			Solo muestra la presión del CO ₂ y la frecuencia respiratoria.
--	--	--	---

Tabla 2 Capnógrafos en el mercado [4]

Además, cabe destacar una característica adicional de todos los capnógrafos sidestream. Todos ellos incluyen más datos a parte de la capnografía. También, incluyen datos como el EtCO₂ (presión parcial al final de la exhalación), SpO₂ (saturación de oxígeno en la hemoglobina arterial), pulso, frecuencia respiratoria y más datos bastante útiles para los médicos. De hecho, todos estos son configurables y se pueden cambiar las unidades de medición.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

JUSTIFICACIÓN

La principal necesidad de este proyecto es el hecho de que el objetivo de las ambulancias es tener una tablet donde se pueda acceder a cualquier sensor, en vez de tener un aparato por sensor. Esto hará que la información esté más concentrada. Como se ha visto en la Tabla 2, actualmente, el mercado está lleno de capnógrafos que trabajan de manera individual. Además, los capnógrafos que existen vienen con tantos detalles como la configuración de los datos mostrados, la configuración del caudal de la bomba o de alarmas, que no tiene sentido intentar meterse en ese mercado.

Existe otro detalle a tener en cuenta que es el uso de los tubos. Estos van desde el paciente hasta el capnógrafo, lo cual puede resultar bastante molesto para los enfermeros en la ambulancia. Estos tienen que moverse rápidamente por la ambulancia, mover la camilla y más cosas que se verán bastante afectadas en caso de que haya tubos o cables por medio. Sería de gran ayuda poder eliminar ese tubo.

El proyecto consistirá en un desarrollar un capnógrafo que pueda ser utilizado en la ambulancia o helicóptero de urgencias. El capnómetro se comunicará vía Bluetooth con el capnógrafo, el cual será una aplicación que irá en la tablet que se lleve en la ambulancia. Esto solucionará tanto los problemas de cables/tubos como se adaptará a la evolución hacia las tablets en las ambulancias o helicópteros.

OBJETIVOS

- 1) Realizar un profundo estudio del arte
- 2) Realizar el diseño de la idea principal

- 3) Buscar, comparar sensores de CO₂ que cumplan los requisitos del proyecto, tanto en precisión como en rapidez.
- 4) Buscar y comparar bombas que puedan ser utilizadas para extraer una muestra de exhalación del paciente.
- 5) Integrar la bomba y el sensor en un sistema controlado por un microcontrolador.
- 6) Integrar en el sistema un módulo bluetooth que envíe las medidas obtenidas y enviarlas a un terminal serial a un móvil.
- 7) Construir una tarjeta dónde se pueda montar todo el sistema anterior.
- 8) Diseñar una aplicación que haga una gráfica con las medidas obtenidas.
- 9) Diseñar un control para la velocidad angular de la bomba

Cabe destacar que se espera que este proyecto tenga futuros desarrollos, por lo que se desarrollará un primer prototipo, así que los objetivos no incluirán cubrir todas las posibilidades tanto del capnógrafo como del capnómetro.

ORGANIGRAMA

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Tarea 1								
Tarea 2								
Tarea 3								
Tarea 4								
Tarea 5								
Tarea 6								
Tarea 7								
Tarea 8								
Tarea 9								

Tabla 3 Organigrama

ESTUDIO ECONÓMICO

Componentes	Cantidad	Precio unitario	Coste total
Microbomba	1	112,61	112,61
Sensor de CO2	1	314,77	314,77
Tarjeta de desarrollo ICAI	1	100	100
HC-05(Modulo Bluetooth)	2	7,5	15
Coste Total Componentes			542,38

Tabla 4 Costes de los componentes

Herramientas y equipos	Cantidad	Precio unitario	Tiempo Amortización	Coste amortización
Soldador de estaño	1	15	8	1,875
Osciloscopio	1	1000	8	125
Polímetro	1	25	8	3,125
Ordenador	1	400	4	100
Coste Total Herramientas y Equipos				230

Tabla 5 Costes de las herramientas y equipos

Software	Precio licencia	Coste total
MPLAB X	0	0
App inventor	0	0
CoolTerm	0	0
Rstudio	0	0
Microsoft Office	0	0
Coste Total Software		0

Tabla 6 Costes de software

Mano de obra	Horas	Precio/hora	Total
Estudio del arte	40	50	2000
Diseño principal	20	50	1000
Búsqueda de sensores	40	50	2000
Búsqueda de bombas	20	50	1000
Integración de bomba y sensor en un sistema	40	50	2000
Integrar sistema Bluetooth	25	50	1250
Construir tarjeta	25	50	1250
Aprendizaje y diseño de App	40	50	2000
Diseño de control	30	50	1500
Documentación	90	50	4500
Coste Total Mano de Obra			18500

Tabla 7 Costes de mano de obra

PRESUPUESTO GENERAL	
Concepto	Coste
Componentes	542,38
Herramientas y equipos	230
Software	0
Mano de obra	18500
TOTAL	19272,38

Tabla 8 Costes generales

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El principal objetivo de los capnógrafos a nivel del desarrollo sostenible, claramente, es promover salud y bienestar. Gracias a estos se puede ayudar a cualquier tipo de persona y en cualquier rango de edad, ayudando a entender que tipo de problema respiratorio o incluso endocrino puede tener. Sin embargo, este proyecto no trata solo sobre el capnógrafo, si no sobre la evolución del servicio sanitario, uno en el que sea más fácil concentrar la información y sea más manejable, metiendo todos los sensores en una tablet. Y no solo eso, también ayudará a los enfermos a que no haya tanta diversidad de aparatos.

Este proyecto, además de tener una gran parte aportando ayuda a promover salud y bienestar, también aporta un gran apoyo a toda la innovación que están suponiendo las técnicas no invasivas en el sector médico. La técnica NDIR, claramente, ya está bastante estudiada, lo que ha permitido que esta se esté utilizando para detectar más tipos de moléculas en el ser humano que permita llegar a diagnósticos de manera más segura. A parte, el hecho de que se quiera instalar una Tablet en la ambulancia donde se pueda monitorizar al paciente, supone un gran avance. Esto puede llevar a poder guardar toda la monitorización de un paciente y los médicos podrán tener acceso a todos estos datos. Y no solo eso, mediante machine learning sería posible pasar todos los datos medidos en el paciente y entrenar modelos que sean capaces de diagnosticar posibles enfermedades. Una vez con este diagnóstico el médico podría contar con una segunda opinión, que, ante todo, sería bastante útil, ya que estos modelos pueden tener en cuenta muchos más datos de los que un médico

es capaz. En conclusión, este proyecto es parte del camino hacia el que va el sector médico, que es la centralización de la monitorización y la creación de modelos entrenados para tener en cuenta grandes bases de datos.

El hecho de que se quiera evolucionar hacia la reducción de los aparatos utilizados y tenerlos todos dentro de una Tablet, lleva a pensar que un objetivo secundario es el consumo y producción responsable. Al solo tener una Tablet no se fabricarán tantos aparatos y en caso de que se quiera actualizar, solo hay que actualizar el software y no hay que fabricar o comprar un capnógrafo nuevo.

En conclusión, el hecho de desarrollar un capnógrafo portátil cumple objetivos de desarrollo sostenible comprendidos en mejoras económicas y sociales. Dentro de los objetivos sociales está el principal que es mejorar la salud y el bienestar de la población. Y en cuanto a los económicos, cumple en innovación y producción sostenible.

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

En este apartado se mostrará la idea principal que guiará el desarrollo del proyecto. El sistema desarrollado se basará en dos módulos, como se puede ver en la Figura 7, uno es el capnómetro y el otro es el capnógrafo. Estos dos se comunicarán mediante vía Bluetooth. El objetivo principal es que el capnómetro sea el que mande mensajes al capnógrafo y controle la microbomba, y a parte, que el capnógrafo plotee las medidas. Una vez se consiga esto satisfactoriamente, ya se podrá pensar en desarrollar comandos de configuración desde el capnógrafo que varíen el modo de funcionamiento del capnómetro. Por lo que se desarrollará primero el capnómetro, y a continuación, se desarrollará el capnógrafo para poder leer correctamente los mensajes del capnómetro.

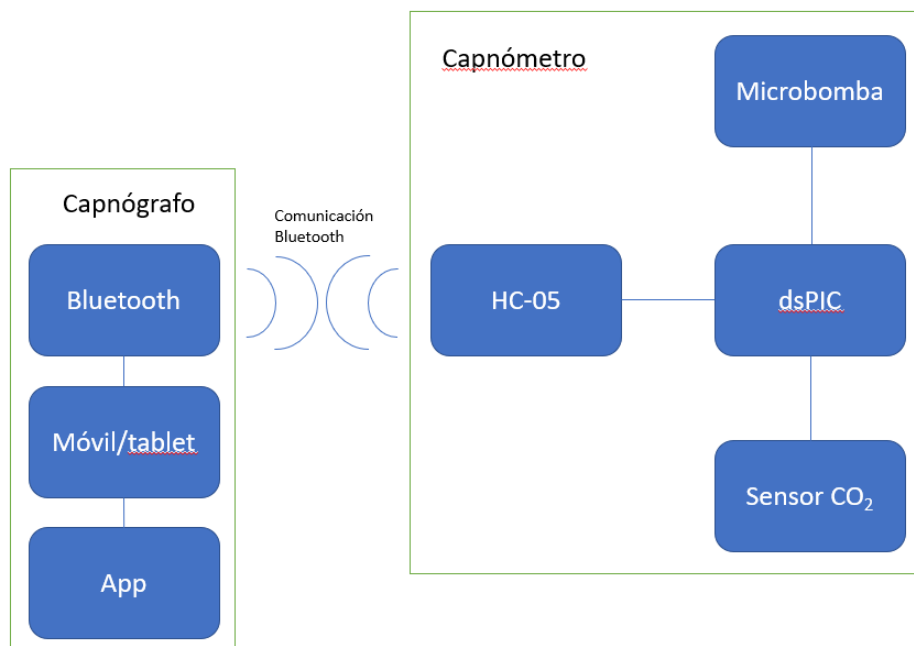


Figura 7 Diseño del sistema

Es importante resaltar que este proyecto consistirá en hacer el primer prototipo del capnógrafo. El objetivo no abarca desarrollar una interfaz muy compleja o un sistema que contemple todos los comandos del capnómetro, si no conseguir que el capnómetro mida

concentraciones y lo envíe al capnógrafo, sin esperar recibir nada del capnógrafo. Sin embargo, sí se diseñará esperando a que futuros desarrollos sean capaces de hacer esto.

CAPNÓMETRO

DISEÑO

La misión principal del capnómetro será la de extraer una muestra de la exhalación del paciente, medir la concentración de CO₂ y enviar este valor por Bluetooth. Además, también deberá controlar la velocidad angular de la microbomba.

Como ya se mostró en la Figura 7, el capnómetro será controlado por un dsPIC y contará con una microbomba, un sensor de CO₂ y el módulo Bluetooth, por lo que habrá que ver las características de los periféricos más óptimos y comprobar que el microcontrolador cumpla con los requisitos.

Sensor de CO₂

La principal característica de las urgencias médicas es que necesitan datos continuos y precisos para poder monitorizar correctamente el estado del paciente. Primero, hay que tener en cuenta dos restricciones: una velocidad de muestreo, que sirva para poder hacer una buena gráfica y el porcentaje máximo de concentración que pueda medir, el sensor tiene que poder cubrir valores de hasta el 80% como poco, para que no llegue a saturar y así, los médicos no pierdan información. Ya se vio anteriormente que la precisión irá de la mano del porcentaje máximo a medir, pero de todas formas habría que maximizar la precisión lo máximo posible sin sacrificar las dos restricciones. Para terminar, no se valorará la opción de fabricar el sensor, ya que es un proceso muy costoso y es bastante complicado. Los sensores de CO₂ que se hayan en el mercado tienen resultados muy buenos de velocidad, concentraciones máximas y precisión.

Claramente, habrá que utilizar un sensor que mida a través de un flujo, ya que los sensores que trabajan a difusión son muy lentos. Entre los sensores de CO₂ que miden un flujo se escogerá una concentración máxima del 100% debido a que con 60%, que es la

siguiente concentración máxima disponible en el mercado, saturaría. Actualmente, el mercado de este tipo de sensores de CO₂ está claramente liderado por la empresa GSS (Gas Sensing Solutions), que cuenta con sensores especializados en robustez, rapidez o bajo consumo. Como se explicó anteriormente la rapidez será el principal criterio de diseño.

Entre los sensores más rápidos de GSS, los SprintR, se encuentra el modelo -R, Figura 8, el cual es el más rápido del mercado llegando a las 50 muestras por segundo.



Figura 8 Sensor de CO2 SprintIR-R

Hay que tener en cuenta que este tipo de sensores tienen un tiempo de respuesta que depende del caudal del flujo, Figura 99. Cabe destacar que los dos sensores que se muestra en la figura son los dos hermanos pequeños del SprintIR-R, que son más lentos.

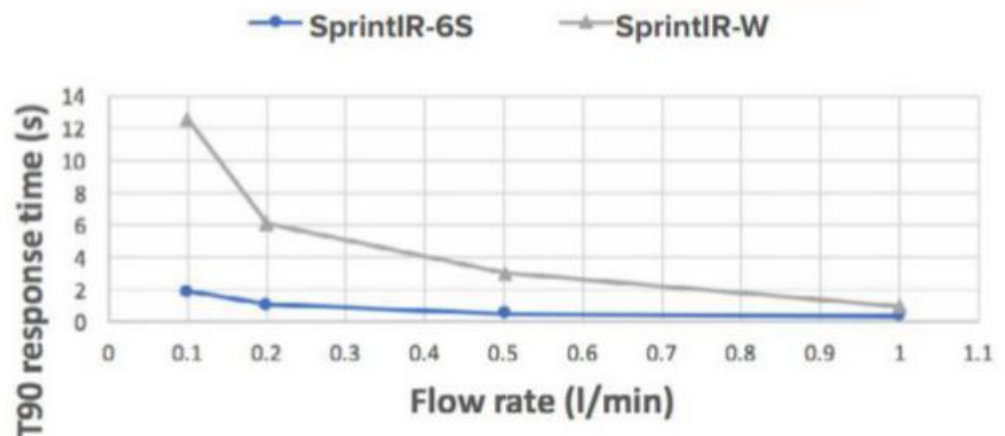


Figura 9 Tiempo de respuesta frente a caudal

Para terminar, es importante resaltar que este sensor cuenta con un microcontrolador dentro y un puerto UART, factor que habrá que tener en cuenta para el microcontrolador. El hecho de que tenga un microcontrolador le da la posibilidad de que se le puedan mandar

diferentes comandos para calibrarlo (aunque viene calibrado de fábrica), cambiar su modo de trabajo o medir otros datos como humedad, presión o temperatura, cosas que pueden ser muy útiles en un futuro. En la Tabla 9 se muestra la sintaxis correspondiente a algunos de los mensajes que se pueden enviar al sensor. Como se puede observar la sintaxis para cada mensaje y su respuesta es diferente, es por esto que será vital conseguir procesar correctamente las respuestas o formar los mensajes. Esto se detalla más adelante en el apartado correspondiente al diseño de la UART.

Syntax	Use	Example	Response	Comments
A ###\r\n	Set value of the digital filter	A 128\r\n	A 00128\r\n	See "Digital Filter"
a\r\n	Return the value of the digital filter	a\r\n	a 00128\r\n	See "Digital Filter"
F #####\r\n	Fine Tune the zero point	F 410 400\r\n	F 33000\r\n	See "Zero Point Setting"
G\r\n	Zero-point setting using fresh air	G\r\n	G 33000\r\n	See "Zero Point Setting"
H\r\n	Returns the relative humidity value		H 00551\r\n	
K #\r\n	Switches the sensor between different modes	K 1\r\n	K 1\r\n	
M ###\r\n	Sets the number of measurement data types output by the sensor	M 6\r\n	M 6\r\n	See "Output Fields"

Tabla 9 Interfaz del SprintIR

Microbomba

La bomba que se utilice tiene que satisfacer dos características: que sea capaz de dar el caudal necesario y que sea controlable.

La gran mayoría de los capnógrafos Sidestream absorben con caudal entre los 50 y 150 ml/min. Sin embargo, en este proyecto el SUMMA ha pedido que sean 50 ml/min. De todas formas, no se limitará el proyecto y se buscará una microbomba que pueda dar caudales mayores en caso de que en un futuro se quiera poder variar el caudal.

El caudal que una bomba da puede variar por muchos factores como pueden ser cambios en el voltaje medio de la alimentación, estrangulamientos en el tubo que lleva el aire hasta la bomba o incluso el hecho de que una misma bomba irá dando caudales menores para el mismo voltaje debido al desgaste. En caso de que esto suceda la capnografía podría cambiar de forma, causando así posibles diagnósticos erróneos. Esta es la principal razón por la que se necesitará una bomba que tenga señales eléctricas que permitan conocer el caudal con el que se está extrayendo y así, poder controlarlo.

Para escoger una bomba, primero, se ha optado por buscar una que sea barata, esta será sometida a muchas pruebas lo que desgastará más la bomba. La diferencia de precio entre las microbombas radica sobre todo en la vida útil de los cables, el consumo de potencia y el tamaño. En caso de que la barata no de problemas se mantendrá. Hacer un cambio en el control de la bomba no supone mucho trabajo debido a que todas funcionan con las mismas señales eléctricas, un encoder y un control basado en un PWM.

La microbomba escogida es la 220 BLZ de micropumps, Figura 10, está es capaz de dar caudales entre 0 y 400 ml/min con alimentación entre 3 y 6 V. Solo pesa 30 gr, no llegará a los 15 dB y puede llegar a tener una vida útil de 10 000 horas. Además, cuenta con tres señales, el encoder, el control PWM y la señal CW, para cambiar el sentido de giro. Por lo que resulta una microbomba perfecta para este sistema.



Figura 10 Microbomba 220 BLZ

Para concluir, hay que conocer cómo funciona su encoder, como ya se mencionó en el apartado de los encoders, no son todos iguales. Este en concreto enviará una señal cuadrada con una frecuencia que será el doble que la frecuencia a la que realmente este girando, llegando a girar a una frecuencia máxima de 200 Hz, por lo que se recibirá una señal de 400 Hz.

Módulo Bluetooth

Para poder establecer la comunicación entre el microcontrolador y el dispositivo que ejecute la aplicación hará falta algún módulo que sea capaz de llevarlo a cabo. Obviamente, se podría establecer con otros medios como zigBee, WiFi o RF, que de hecho son más rápidos que el Bluetooth y no habría tanta latencia, pero en la comunicación con una Tablet o móvil es mucho más fácil de implantar una comunicación Bluetooth. Además, esta llega a ser suficiente para esta aplicación y es más barata. En este caso se utilizará el módulo HC-05, Figura 11, el cual solo cuenta con un puerto UART y es muy fácil de implantar. Además, se le pueden mandar comandos AT para poder elegir parámetros como su ID o el Baudrate. Haciendo un cálculo rápido, sabiendo que el baudrate más pequeño es 9600, a 10 bits por mensaje, se concluye que puede mandar 960 mensajes de 8 bits por segundo como poco. Por lo que podemos concluir que no habrá problemas con los 50 valores por segundo que enviará el capnómetro.

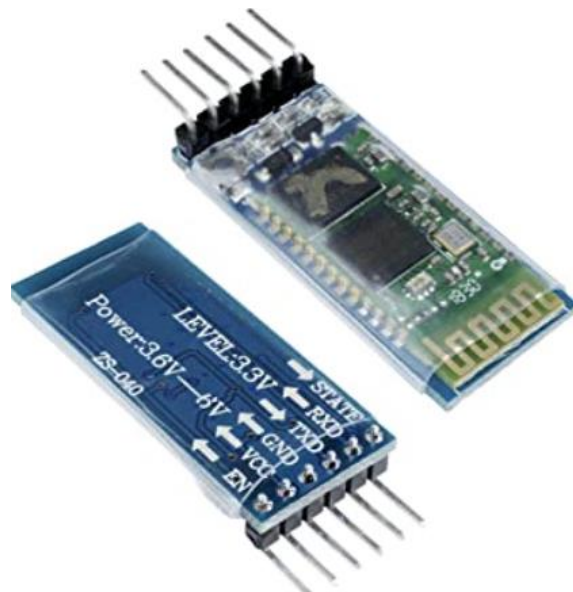


Figura 11 Módulo HC-05

UART

Es importante pensar en cómo se va a estructurar la UART, ya que ella te va enviando datos sin cesar y hay que manejar estos datos con cierto orden. Hay que tener en cuenta la

manera de enviar datos del capnómetro, este enviará una letra, y 5 números. La letra corresponderá al tipo de medida que viene en los números, ya sea concentración filtrada o no, temperatura, presión o puede ser información sobre su modo de trabajo. Por eso se ha pensado que una solución para esto sería utilizar dos buffers circulares para organizar todo. La característica de estos buffers es que cuando se han llenado, pasan a llenar los valores del principio del buffer y así no machacar los valores más recientes.

El primer buffer estaría formado por caracteres y guardaría todo el chorro de datos recibido por la unidad de recepción de la UART. El segundo estaría formado por vectores de caracteres y contendría los mensajes, ya que existiría una función que cortase el primer buffer y formase mensajes. Así luego existiría una función, la cual se activaría cada vez que haya un mensaje completo nuevo y sería la encargada de descifrar el mensaje. Este sistema ocupa más memoria al contener dos buffers para guardar toda la información, pero es muchísimo más eficaz a la hora de realizar la depuración del programa y poder leer cómodamente los mensajes recibidos. Una vez se desarrolle del todo, sería más óptimo unificar estos dos buffers. Sin embargo, este sistema no tiene sentido para el Bluetooth, por lo que su UART contará únicamente con un buffer de caracteres.

CONTROL DE VELOCIDAD

Como ya se ha explicado anteriormente, es importante que la bomba siempre esté forzando el mismo caudal. Por eso, el estrangulamiento de un tubo puede resultar un gran problema, si esto sucede, esto reducirá el caudal que pueda pasar, aumentando la presión en la bomba y disminuyendo su velocidad de giro. Además, esto puede llegar a dañar la bomba, reduciendo así su vida útil. De hecho, al ir desgastándose irá dando menores frecuencias para el mismo voltaje, lo que implica que habrá que hacer un control que varíe su respuesta a lo largo de la vida de la bomba.

Ahora que está completamente justificado el hecho de utilizar un control para la velocidad de giro de la bomba se comenzará a diseñar. El control que se implantará será sencillo y no necesitará que se desarrolle un modelo de la planta. Primero, se diseñará para que la referencia sea una frecuencia de giro y no un caudal. Una vez se consiga esto,

mediante un caudalímetro, se debería caracterizar una recta para convertir esa frecuencia en un caudal. Como se puede apreciar en la Figura 12, esta referencia será comparada con la frecuencia leída en el encoder. Una vez se tenga el error se generará el mando sumando el error de esa muestra más el error acumulado, estando respectivamente multiplicados por dos coeficientes, K y K_i . El mando calculado pasará por el anti-windup, que hará que este sature, por lo que si se hace mayor que el 100% lo forzará a ser 100% y lo mismo en caso de que sea menor que el 0%. A continuación, el mando afectará a la bomba influyendo así en su frecuencia de giro.

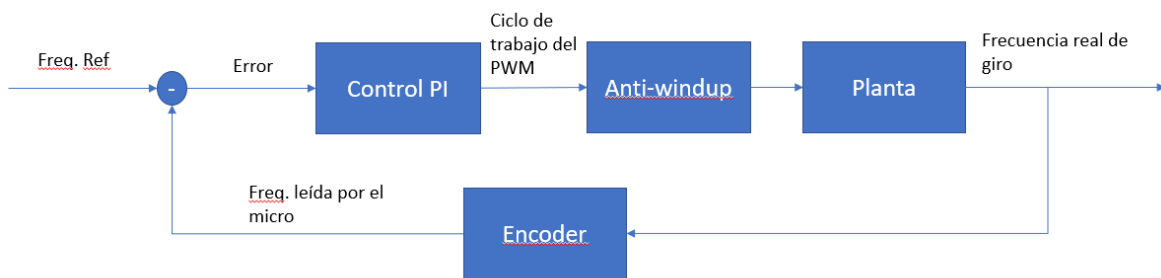


Figura 12 Control en lazo cerrado de la velocidad de giro de la bomba

Para conseguir los parámetros se realizará a ensayo y error, viendo como varían las respuestas de la bomba y escogiendo la que más estable parezca y que carezca en la medida de lo posible de oscilaciones. Además, se caracterizará una recta que enfrente el ciclo de trabajo frente a la frecuencia de giro con el objetivo de poder realizar un ensayo en lazo abierto para ver el efecto del control.

IMPLEMENTACIÓN

Ahora que ya se conocen los periféricos con los que contará el microcontrolador, se empezará a pensar en cómo este manejará todos ellos. Como ya se ha comentado anteriormente, estará conectado con el capnómetro mediante UART, con la microbomba,

que tendrá dos señales, el PWM y el encoder o Signal output, y el módulo HC-05 con el que se conectará por UART. Esto se puede ver en la Figura 13. Es

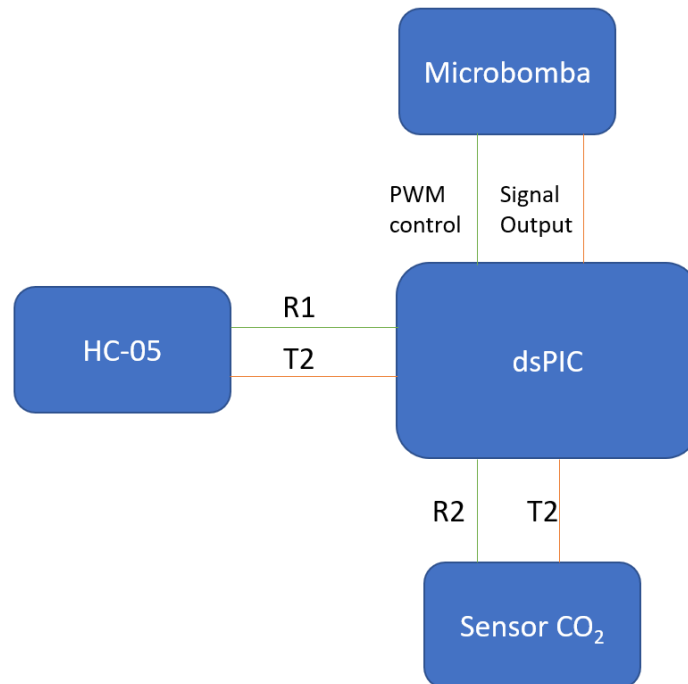


Figura 13 Diagrama periféricos capnómetro

La idea de este sistema es que el microcontrolador ejecute un bucle scan con un periodo determinado y vaya haciendo las diferentes tareas que le corresponden a cada periférico. Para saber el periodo de ejecución del bucle hay que conocer las limitaciones temporales de cada dispositivo. Primero, está el capnómetro, quien dará 50 valores por segundo. A parte, el encoder de la microbomba enviará una señal como máximo de 400 Hz. Por lo tanto, se utilizará como criterio la frecuencia del encoder, que será más restrictivo.

Para leer correctamente una señal de 400 Hz, habrá que leer a la frecuencia de Nyquist, es decir, al doble, 800 Hz. Esto corresponde a un periodo de 1,25 ms. En conclusión,

se utilizará un periodo de 1 milisegundo para la ejecución de cada bucle, ya que 1 milisegundo es más manejable que 1,25.

El microcontrolador trabajará haciendo la siguiente rutina de tareas:

1. Lectura Signal output
2. Detección de flanco de subida
Si hay detección de flanco de subida: ejecutará la tarea Bomba
3. Recepción de mensajes por Bluetooth
4. Recepción de mensajes por capnómetro
5. Procesado de UART 1(Bluetooth)
6. Procesado de UART 2(Capnómetro)
7. Tarea Idle

A continuación, se procederá a explicar cada tarea:

- Lectura Signal output y detección de flanco de subida: En cada bucle se leerá si Signal Output será 0 o 1 y se comparará con el valor obtenido en el anterior bucle, en caso de que haya un flanco de subida se ejecutará la tarea Bomba, esta se muestra a continuación:
 1. Cuenta el número de veces que ha detectado un flanco, si ha contado 3 flancos procederá al siguiente paso, si no saldrá de la tarea Bomba.
 2. Al contar 3 flancos, es que el encoder ha dado una vuelta, por lo que se guarda el tiempo que ha tardado en dar esa vuelta. Este proceso lo hará 5 veces, sumará los 5 periodos obtenidos y calculará la media. Así evitará ruido y suavizará el efecto de periodos mal obtenidos. Además, obtendrá la frecuencia correspondiente a ese periodo y pasará al paso 3.
 3. Ejecutará un control PI en el que la entrada será la frecuencia y la salida el PWM para controlar la bomba.
- Recepción de mensajes por Bluetooth o capnómetro: en esta tarea se detectará si existe algún mensaje que no haya sido leído. Los caracteres recibidos por Bluetooth, serán comandos enviados desde el capnógrafo, que serán capaces de cambiar

parámetros del programa, ya que el capnógrafo también podría funcionar a modo de interfaz. En el caso del capnómetro, si se detecta un mensaje nuevo se separará la letra del número, y según que letra sea se podrá actuar de una manera u otra. En caso de recibir concentraciones serán directamente redirigidas a la unidad de transmisión del módulo de Bluetooth, cuyo valor será recibido por el capnógrafo y, a continuación, plotados.

- Procesado de UART: esta función será la encargada de ver si hay caracteres nuevos recibidos, y analiza el buffer para ver si se ha formado un mensaje entero. Obviamente, este algoritmo será diferente para el capnómetro y para el Bluetooth, ya que cada uno tendrá su código. Una vez haya formado un mensaje nuevo, lo guardará en el buffer de mensajes y será analizado por la tarea de recepción de mensajes.

CAPNÓGRAFO

El capnógrafo será una aplicación desarrollada en el entorno MIT App Inventor. Este entorno permite desarrollar aplicaciones con programación en bloque, lo que es bastante sencillo y permite a gente que no sabe programar en lenguajes destinados a las aplicaciones.

DISEÑO

La aplicación consistirá en una gráfica que muestre el valor recibido en una gráfica y cuando llegue al extremo de la pantalla, volverá a plotear desde el principio por encima de los anteriores valores. A parte, contará con un recuadro donde se mostrarán los valores que se vayan recibiendo y, además, tendrá unos pulsadores para escoger dispositivos Bluetooth, para conectarse o desconectarse del dispositivo escogido y otro para limpiar la pantalla. Es importante recordar que, por el momento, el objetivo no es crear una aplicación muy inteligente, la cual sea capaz de mandar comandos al capnómetro.

Esta aplicación tendrá que dibujar nuevos puntos cada cierto periodo, por lo que tendrá que contar con dos funciones básicas que serán activadas por un timer: recoger el valor del puerto bluetooth y pintar la gráfica. En cuanto al periodo de ejecución, este no tendrá que ser necesariamente el mismo que el del sensor de CO₂, puesto que cada vez que

se activa el timer, el capnógrafo mirará si hay valores disponibles. Sin embargo, si que tendrá que ser más rápido que él, puesto que se ha escogido un periodo de 1 milisegundo. Cabe destacar, que solo pintará si recibe valores, por lo que habría que programar ciertas protecciones en caso que el capnómetro deje de mandar valores. A parte, la idea para pintar la gráfica sería contar con un vector que guarde los valores recibidos y que pinte una línea desde el punto anterior hasta el nuevo. Pero, no sin antes borrar las líneas anteriormente dibujadas. Para esto, se pintarán en blanco las líneas que se quieran borrar.

Está aplicación estará dividida en 3 modos de operación: inicio de aplicación, reposo, conexión con el dispositivo bluetooth.

1. Inicio de aplicación: este modo solo se ejecutará nada más empezar la aplicación. Como existen múltiples dispositivos con anchos y altos diferentes, la aplicación se diseñará con dimensiones adaptables. Por lo que en este modo sacará la altura y la anchura y adaptará las dimensiones de los pulsadores, el display y la gráfica. Además, creará un vector de valores del tamaño de la anchura de la pantalla, donde ira guardando los valores de las concentraciones. Además, inicializará todas las variables correspondientes como una dirección MAC o el número de bits que leerá en cada lectura, 10 en caso de la UART.
2. Reposo: en este modo no hará nada y estará a la espera de que activen un pulsador. En caso de que pulsen la lista de dispositivos, desplegará una serie de dispositivos bluetooth que estén cerca junto a su dirección MAC. Una vez escogido el dispositivo, asignará esta dirección a la correspondiente variable. Sin embargo, todavía no mostrará valores.
3. Conexión con el dispositivo bluetooth: entrará en este modo una vez se active el pulsador de conectar y haya un dispositivo seleccionado. En este modo irá ploteando los valores recibidos por el bluetooth. El capnógrafo también contará con el botón “Desconectar” que le permitirá volver al estado anterior.

Capítulo 6. SOLUCIÓN DESARROLLADA

En este apartado se mostrarán y se analizarán los principales resultados obtenidos en todo el sistema.

CAPNÓMETRO

Se han conseguido integrar satisfactoriamente la microbomba, el sensor y el módulo bluetooth en un shield que se acopla en la tarjeta de desarrollo tal y como se planteó en el diseño principal. En la Figura 14 se muestra el resultado final del capnómetro desarrollado. Como se explicó anteriormente se ha usado un shield de Arduino y se le han soldado tanto el sensor como la microbomba. Este shield se ha pegado a la tarjeta de desarrollo de ICAI y se ha utilizado para hacer todo el programa y depurar el programa.

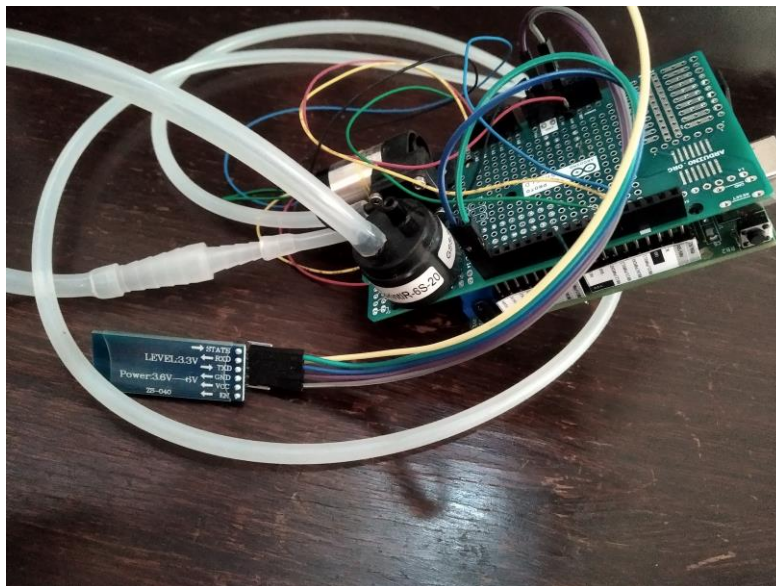


Figura 14 Capnómetro resultado final

Esta tarjeta cuenta con un puerto UART que se ha conectado al ordenador y se ha utilizado el programa CoolTerm para ir viendo las variables del sensor y de la microbomba. Se ha conseguido satisfactoriamente que el capnómetro mida valores y que los manda por la

UART. Una vez ha funcionado se ha cambiado la conexión de la UART y se ha enviado por el módulo HC-05 los valores obtenidos. Con la aplicación “Serial Bluetooth Terminal” se ha conectado con el módulo y se ha podido utilizar a modo de terminal serie para mostrar por el móvil los valores recibidos.

CONTROL DE VELOCIDAD DE GIRO

Para poder determinar si el control tenía algún efecto de verdad se han hecho ensayos en lazo abierto y cerrado para poder ver el efecto de una perturbación.

Primero, se ha desarrollado la planta de la bomba mandando diferentes ciclos de trabajo y leyendo la correspondiente frecuencia. Esto ha permitido caracterizar la recta de trabajo de la bomba mostrada en la Figura 15.

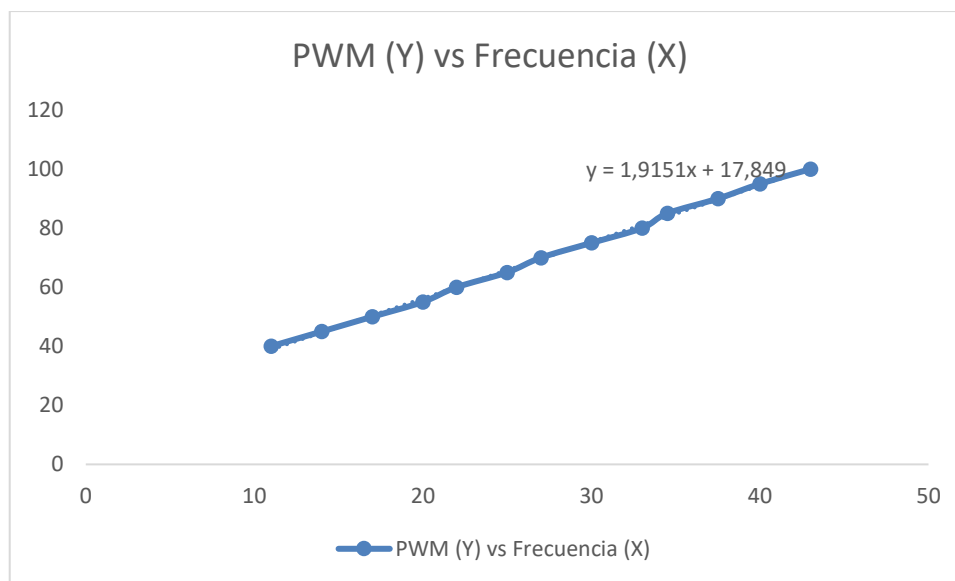


Figura 15 Caracterización bomba

La recta conseguida permite saber que ciclo de trabajo mandar en el PWM para conseguir una determinada frecuencia. Sin embargo, como ya se ha explicado la bomba se irá desgastando y con el tiempo esta recta se irá quedando obsoleta. Sin embargo, como el desgaste de la bomba es impredecible se ha intentado que el control diseñado sea

independiente de una caracterización, por lo que se esta recta será útil para comparar el control en lazo abierto y cerrado.

El método para escoger los parámetros K_p y K_i del control ha sido por ensayo y error, intentando que no tuviese muchas oscilaciones y viendo cómo reacciona ante perturbaciones como obstruir el tubo que lleva el aire a la bomba. Se ha llegado a un K_p de 1,2 y un K_i de 0,3 llegando a tener un tiempo de establecimiento de cerca de 10 segundos fijando una referencia de 35 Hz de frecuencia de giro. En las Figuras 16 y 17 se muestra el ensayo de arranque de la bomba donde se puede ver que no existe ningún tipo de saturación en el mando y la frecuencia llega correctamente a los 35 Hz.

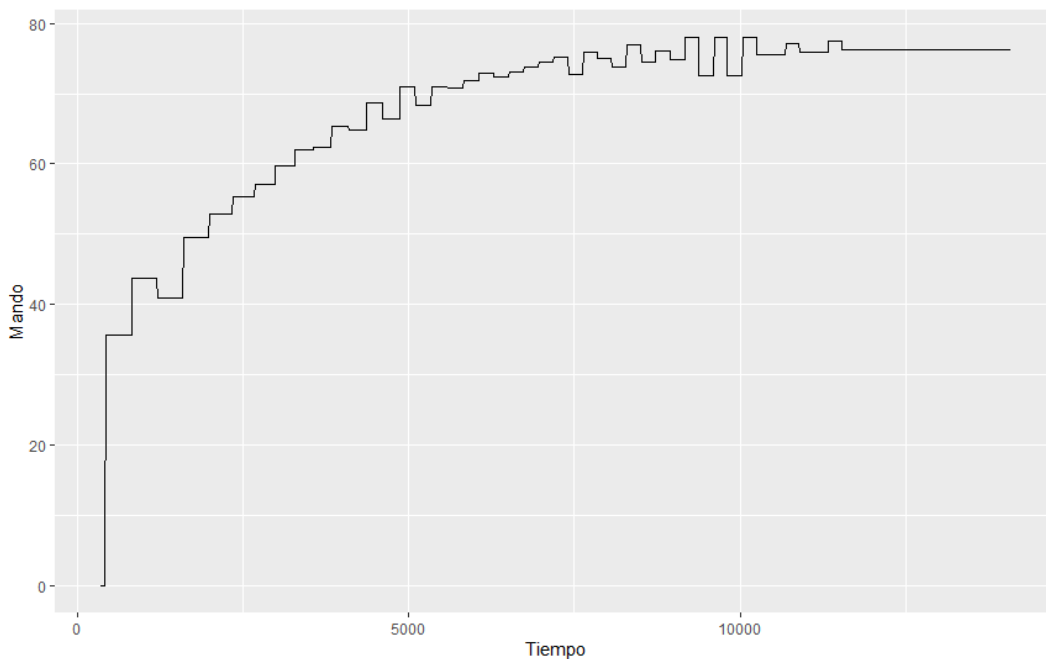


Figura 16 Ensayo de arranque de la bomba-Mando

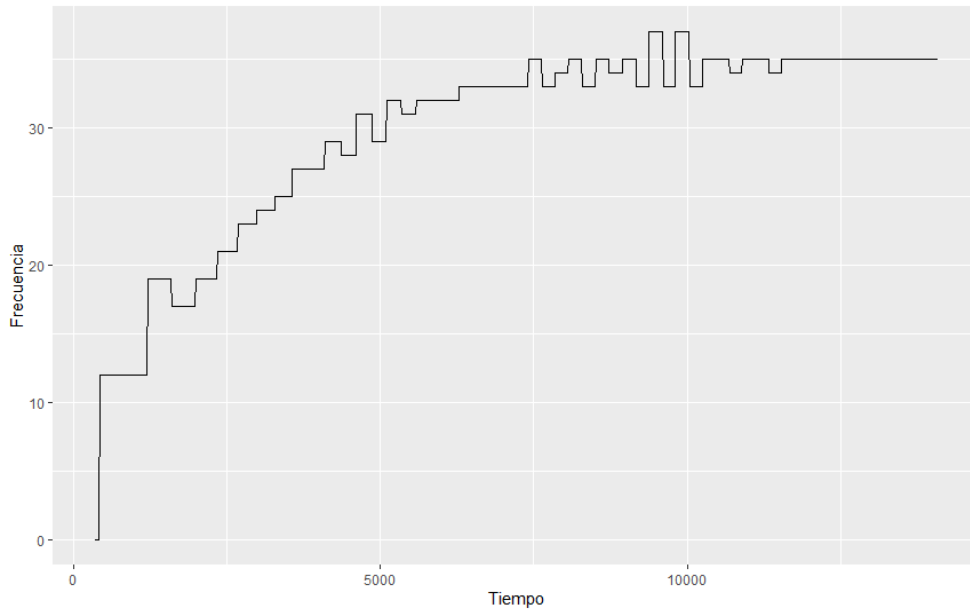


Figura 17 Ensayo de arranque de la bomba -Frecuencia

Para ver si realmente este control tendrá un efecto se ha hecho un ensayo en el que se ha obstruido momentáneamente el tubo lo que debería disminuir el caudal y con ello la frecuencia de giro.

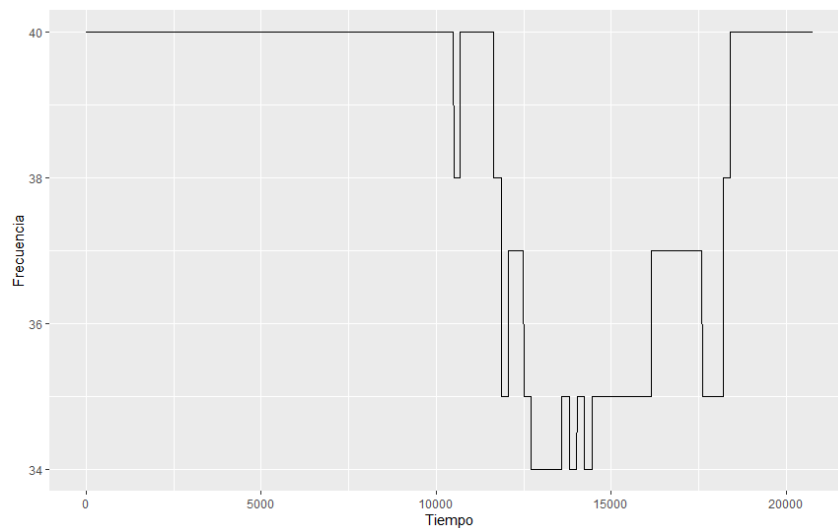


Figura 18 Ensayo de obstrucción en lazo abierto- Frecuencia

Como se puede observar en la Figura 18, en el momento de obstruir el tubo, la frecuencia de giro y la bomba no hace nada por remediarlo, aunque luego vuelve correctamente a su valor predefinido. Cabe destacar que la frecuencia a la que esta girando sin perturbaciones es 40 Hz, a pesar de que la referencia está en 35. Existe una diferencia de tiempo desde que se caracterizó la recta y el momento de hacer el ensayo, en este tiempo se ha estado usando la bomba y ha sufrido debido a multiples ensayos que han hecho que esta se desgaste haciendo que, como se comentó anteriormente, la recta caracterizada quede obsoleta. Esto refuerza el hecho de que haya que utilizar un control para la bomba.

A continuación se mostrarán los resultado obtenidos antes esta obstrucción en lazo cerrado en las Figuras 19 y 20.

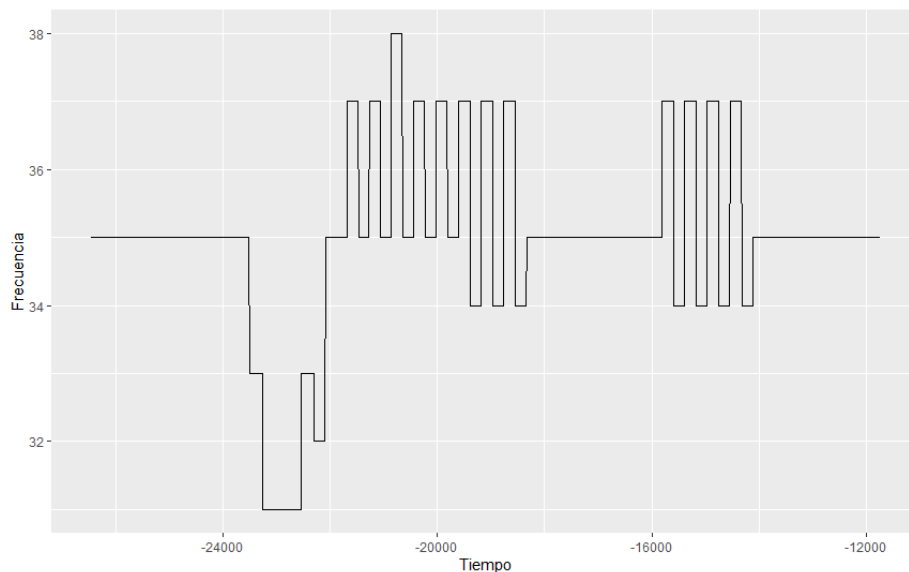


Figura 19 Ensayo obstrucción lazo cerrado- Frecuencia

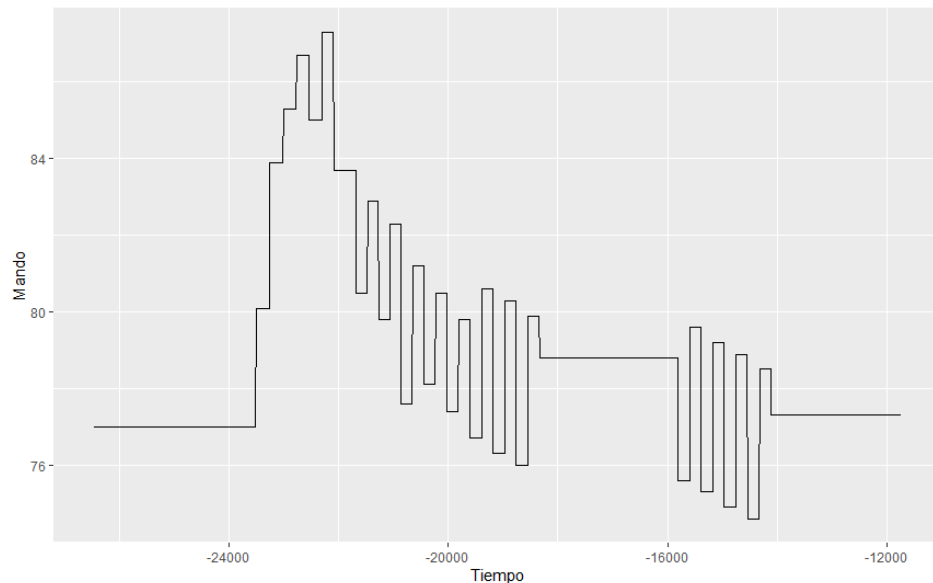


Figura 20 Ensayo obstrucción lazo cerrado- Mando

Como se puede apreciar, la frecuencia se ve afectada, al disminuir tanto, el mando se dispara para devolver la frecuencia a su valor, llegando a un estado en el que el mando se ha visto incrementado de su valor natural pero manteniendo la frecuencia en 35. Una vez se deja de obstruir los dos valores vuelven a su estado original sin problemas. Cabe destacar como último detalle que el tiempo aparece como negativo en estas figuras, esto es debido a que la variable tiempo se ha definido incorrectamente como un signed int, lo que hace que a al verse incrementado pase a ser negativa. Sin embargo, este dato no descarta las conclusiones recientemente sacadas.

CAPNÓGRAFO

A continuación, en la Figura 21 se muestra la aplicación desarrollada para hacer de capnógrafo. Esta ha conseguido conectarse satisfactoriamente al capnómetro y mostrar todos los datos, no solo numéricamente en el pequeño recuadro superior, si no que también genera la gráfica en tiempo real.

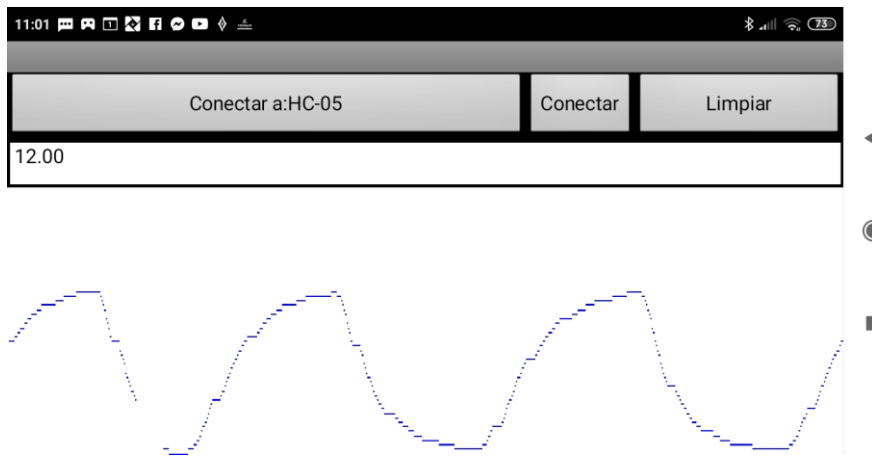


Figura 21 Capnografía realizada con la aplicación

Claramente, el desarrollo de esta aplicación ha sido muy útil para ver el funcionamiento del capnómetro en tiempo real. Sin embargo, faltaría un buen diseño para que esta aplicación se adapte bien a cualquier dispositivo, además, de que el AppInventor no tendrá acceso ilimitado a las variables del móvil. Por ejemplo, el timer no se puede programar en función del oscilador del móvil, el periodo mínimo es 1 milisegundo y un móvil puede contar con periodos mucho menores. Es por esto, que la aplicación podría ser desarrollada en un entorno más versátil y que no presente ningún tipo de limitación.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Como conclusión principal se puede decir que claramente es proyecto viable. El campo de los capnógrafos ya está muy explorado pero el hecho de que las ambulancias estén incorporando tablets donde se lleve la monitorización da pie a la viabilidad de este proyecto.

En cuanto al sensor utilizado, ha sido claramente satisfactorio. Es bastante intuitivo, robusto y responde correctamente ante los comandos. En futuros desarrollos habría que comprobar los datos que da y calibrar, aunque ha parecido dar valores bastante lógicos.

La microbomba utilizada ha cumplido su función, aunque ha sido dañada por tantos ensayos. Además, los cables en ocasiones había que tocarlos un poco para que se volviesen a conectar. Posiblemente, en el futuro debería considerarse el cambiar otra bomba que no se vea tan dañada y que la conexión de cables sea mejor.

Ya ha sido construida la base del proyecto, el siguiente paso a dar sería perfeccionarlo. El capnómetro tendría que ser más compacto y optimizado, además de que habría que explorar dónde y cómo colocárselo al paciente. Habría que fabricar una PCB y construirle una especie de caja donde ya este implementado.

En cuanto a la aplicación habría que mejorarla. Posiblemente hacerla en un entorno de desarrollo más versátil como Java o Android Studio. Además de que se tendría que hablar con el cliente para saber que utilidades necesitan en la aplicación.

En conclusión, merece la pena seguir con el proyecto del capnómetro portátil, ya que este aporta un nuevo punto de vista para las ambulancias. En el futuro, el proyecto debería centrarse en hacerlo robusto y versátil, y así esté listo para un entorno en el que no puede fallar.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. hospital, «<http://www.elhospital.com/temas/Utilidad-actual-de-la-capnografia+8061150>,» [En línea].
- [2] «<https://www.elsevier.es/es-revista-semergen-medicina-familia-40-articulo-la-capnografia-los-servicios-emergencia-13135238>,» [En línea].
- [3] «<https://www.shoptronica.com/curiosidades-tutoriales-y-gadgets/4517-que-es-pwm-y-como-funciona-0689593953254.html>,» [En línea].
- [4] «<https://materialmedico24.es/electromedicina/capnografos/capnografos.html>,» [En línea].