



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

DESARROLLO Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN
SISTEMA DE ADQUISICIÓN EEG CON CAPACIDADES DE
PROCESADO

Autor: Javier Benavides Caro

Director: Juan Manuel López Navarro

Madrid, 2018

DESARROLLO Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN EEG CON CAPACIDADES DE PROCESADO

Autor: Javier Benavides Caro
Director: Juan Manuel López Navarro

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TELEMÁTICA Y ELECTRÓNICA

Dedicatoria

TODO: Dedicatoria.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Phasellus laoreet dolor at sodales porta. Morbi facilisis hendrerit lacus vel sollicitudin. Aenean eleifend urna metus, eget vestibulum libero dictum tincidunt. Curabitur quis ultrices lorem. Duis ultricies, eros eget condimentum pharetra, tellus eros lobortis nulla, vel mattis nibh dui et felis. Interdum et malesuada fames ac ante ipsum primis in faucibus. Nam non lorem et ligula condimentum molestie. Fusce quis dolor non metus suscipit commodo. Praesent vel pulvinar lectus. Nullam ac dui eget magna accumsan volutpat. Aliquam sed purus quis lorem dictum rutrum auctor eu enim. Pellentesque a urna ac ligula cursus lacinia. Aenean sodales justo massa, vel imperdiet justo imperdiet ut. Nulla euismod pulvinar arcu eu convallis. Vivamus a tempus nunc, et vulputate nulla.

Sed dapibus aliquam imperdiet. Vivamus est quam, fermentum vitae augue id, ultricies tincidunt massa. Praesent tincidunt ex sem, ut aliquet nulla imperdiet eu. Duis ac ultricies lorem. Aenean consequat ipsum nec arcu aliquam, sit amet interdum quam tempus. In justo odio, bibendum vel nulla nec, aliquet tristique justo. In vel metus ut libero suscipit ultricies.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Proin urna elit, iaculis id quam at, pretium laoreet ipsum. Phasellus ultricies faucibus ex et eleifend. Quisque facilisis erat dolor, ac rhoncus erat convallis et. Aliquam semper eleifend imperdiet. Sed eros ipsum, sagittis in pellentesque vel, vestibulum a augue. Duis sapien mauris, fringilla a tortor ut, sollicitudin volutpat nunc. Pellentesque vestibulum vel arcu in molestie. Nullam fermentum dolor luctus metus efficitur pulvinar. Pellentesque risus enim, tempus id ullamcorper in, maximus id nisl. Cras rhoncus consequat augue eu gravida. Ut efficitur mauris vitae orci dignissim sagittis. Suspendisse vitae massa eget nunc bibendum interdum.

Agradecimientos

TODO: Agradecimientos.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Phasellus laoreet dolor at sodales porta. Morbi facilisis hendrerit lacus vel sollicitudin. Aenean eleifend urna metus, eget vestibulum libero dictum tincidunt. Curabitur quis ultrices lorem. Duis ultricies, eros eget condimentum pharetra, tellus eros lobortis nulla, vel mattis nibh dui et felis. Interdum et malesuada fames ac ante ipsum primis in faucibus. Nam non lorem et ligula condimentum molestie. Fusce quis dolor non metus suscipit commodo. Praesent vel pulvinar lectus. Nullam ac dui eget magna accumsan volutpat. Aliquam sed purus quis lorem dictum rutrum auctor eu enim. Pellentesque a urna ac ligula cursus lacinia. Aenean sodales justo massa, vel imperdiet justo imperdiet ut. Nulla euismod pulvinar arcu eu convallis. Vivamus a tempus nunc, et vulputate nulla.

Sed dapibus aliquam imperdiet. Vivamus est quam, fermentum vitae augue id, ultricies tincidunt massa. Praesent tincidunt ex sem, ut aliquet nulla imperdiet eu. Duis ac ultricies lorem. Aenean consequat ipsum nec arcu aliquam, sit amet interdum quam tempus. In justo odio, bibendum vel nulla nec, aliquet tristique justo. In vel metus ut libero suscipit ultricies.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Proin urna elit, iaculis id quam at, pretium laoreet ipsum. Phasellus ultricies faucibus ex et eleifend. Quisque facilisis erat dolor, ac rhoncus erat convallis et. Aliquam semper eleifend imperdiet. Sed eros ipsum, sagittis in pellentesque vel, vestibulum a augue. Duis sapien mauris, fringilla a tortor ut, sollicitudin volutpat nunc. Pellentesque vestibulum vel arcu in molestie. Nullam fermentum dolor luctus metus efficitur pulvinar. Pellentesque risus enim, tempus id ullamcorper in, maximus id nisl. Cras rhoncus consequat augue eu gravida. Ut efficitur mauris vitae orci dignissim sagittis. Suspendisse vitae massa eget nunc bibendum interdum.

Resumen

Resumen —

No debe superar las 500 palabras.

Palabras clave — TODO: Palabras clave en español, separadas por coma.

Abstract

Abstract —

No debe superar las 500 palabras.

Key words — TODO: Palabras clave en inglés, separadas por coma.

Glosario

bitstream En este contexto se refiere al binario que configura el Hardware de la FPGA.

19

Índice general

Glosario	v
1. Introducción	1
1.1. Alcance y estructura del proyecto	3
1.2. Base teórica	4
2. Estado del Arte	5
2.1. Tipos de electrodos	6
2.1.1. Electrodos húmedos	6
2.1.2. Electrodos secos	6
2.2. Dispositivos similares	6
2.2.1. Proyectos personales	6
2.2.2. Proyectos docentes	6
2.2.3. Comerciales	7
3. Diseño	9
3.1. Diseño base	9
3.2. Adquisición de datos	10
3.3. Transmisión de datos	11
3.3.1. WiFi	12
3.3.2. Bluetooth	13
3.3.3. USB	13
4. Implementación	15
5. Resultados	17
6. Conclusiones	19
Apéndices	21
A. Ejemplos de bloques y comandos útiles en LaTeX	23
A.1. Ejemplo de sección	23

Índice de figuras

1.1. Ejemplo de anatomía humana.	2
1.2. Ejemplo de ECG	3
3.1. Placa final del proyecto base	9
3.2. Esquema del proyecto base	10
3.3. Convertidor Analógico-Digital ADS1299	10
3.4. ESP8266	12
3.5. Resumen de todas las Entradas/Salidas del ESP12-E	13
A.1. Logo de la Universidad Politécnica de madrid.	24

Índice de tablas

3.1. Tabla de registros de la familia ADS	11
3.2. Modos de arranque del ESP12-E	14

1

Introducción

Desde el principio de los tiempos la humanidad se ha esforzado por comprender el entorno que le rodea, aprender de él y usarlo en su propio beneficio para conseguir así hacer su vida más fácil. Por el momento hemos conseguido hacer volar aviones gracias a la observación de los pájaros o crear sistemas de sonar que se asemejan al sistema que utilizan los murciélagos para orientarse. Pero irónicamente, a pesar del esfuerzo invertido, nuestro propio cuerpo sigue albergando secretos que desentrañar que podrían facilitarle la vida a un gran número de personas.

El estudio del cuerpo humano ha sido uno de los temas más polémicos y que más ha evolucionado desde que hay registro. Aunque al comienzo estuvo muy marcado por la superstición y la religión, achacando la mayoría de las dolencias y efectos científicos a la magia, con el paso del tiempo aparecieron personas como Hipócrates y Aristóteles que fueron capaces de aportar un nuevo enfoque basado en la observación y estudio de lo que les rodeaba, asentando unas bases que, posteriormente, serían aprovechadas y mejoradas hasta convertirse en lo que conocemos hoy en día como método científico.

El estudio del cuerpo humano ha seguido diferentes fases a lo largo de la historia. Comparar el cuerpo humano con animales fue uno de los primeros pasos para descubrir cómo estábamos formados por dentro. Posteriormente, aprovechando los cuerpos de personas ya fallecidas se estudió la anatomía humana, permitiendo así crear mapas y dibujos de la estructura del cuerpo humano y sus órganos bastante detallados.

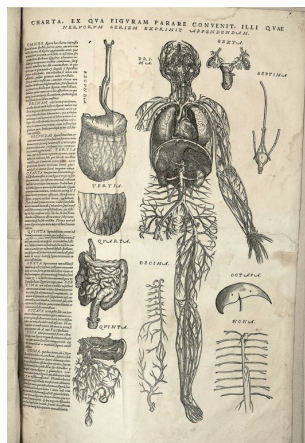


Figura 1.1: Ejemplo de anatomía humana.

Pese a todo, estudiar cuerpos inertes tiene sus limitaciones de modo que durante un tiempo se realizaron vivisecciones para poder comprender mejor como funcionaban todos aquellos órganos, músculos y nervios que ya habían visto con anterioridad. Con el paso del tiempo este sistema fue descartado ya que es una práctica que ponía en peligro la vida del sujeto, haciéndolo pasar por una experiencia terrible en el mejor de los casos.

En la actualidad, gracias al conocimiento acumulado de muchos años y a los avances en otros campos de la ciencia, se han desarrollado dispositivos y técnicas que permiten el estudio en vivo del comportamiento del cuerpo humano de forma no invasiva. Es posible utilizar ecografías para ver el estado del corazón, radiografías para diagnosticar un hueso roto e incluso técnicas más avanzadas como la medicina nuclear que permiten saber que partes del cerebro se activan frente a determinados estímulos sin necesidad de interactuar físicamente con él.

Si bien todas las técnicas anteriores han supuesto auténticos hitos en la medicina moderna y han permitido diagnosticar un gran número de enfermedades así como mejorar la calidad de vida de muchas personas, la mayoría presenta inconvenientes que hacen improbable su uso a nivel personal o docente debido al tamaño de los equipos necesarios para su realización o el coste muy elevado del procedimiento (sin contar con el conocimiento necesario para la realización correcta de la prueba).

Teniendo en mente esta problemática se han desarrollado dispositivos capaces de medir pequeñas las variaciones de voltaje que se producen en el interior de nuestro cuerpo haciendo uso de unos dispositivos denominados electrodos.

De esta forma es posible, con un coste muy reducido y un equipamiento relativamente asequible, conseguir inferir que procesos químicos y físicos se están produciendo en el interior de nuestro cuerpo.

Haciendo uso de este sistema y en función del origen de dichas señales dichos registros reciben distintos nombres: electrocardiograma (ECG) para las señales originadas por las contracciones del corazón; electromiograma (EMG) para las generadas en los músculos; electroencefalograma (EEG) para aquellas generadas en el cerebro, etc.

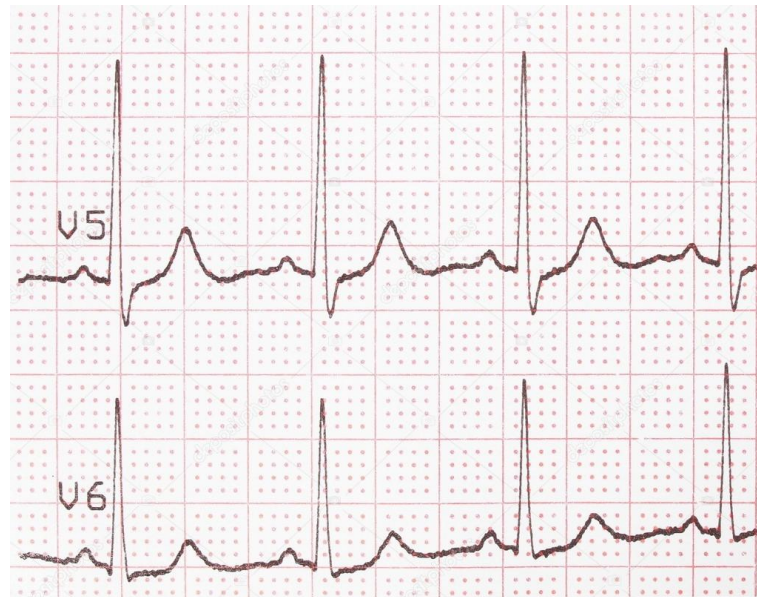


Figura 1.2: Ejemplo de ECG

1.1. Alcance y estructura del proyecto

El objetivo de este proyecto es realizar un sistema capaz de captar señales de electroencefalogramas (EEG) manteniendo una buena relación prestaciones/coste. El sistema estará compuesto de dos tarjetas, una de acondicionamiento y de adquisición de datos basada en el circuito integrado ADS1299 y otra de procesamiento y transmisión de dicha información. Esta última es el objetivo del presente proyecto. La plataforma de procesamiento estará basada en un procesador de altas prestaciones, dispondrá de interfaces Wifi, Bluetooth y almacenamiento USB para la transmisión y almacenamiento de los datos respectivamente.

En la primera fase del proyecto se seleccionará el microcontrolador más adecuado entre los existentes en el mercado analizando características como: capacidad de procesado, interoperación con otros dispositivos, prestaciones...

Se compararán los microcontroladores ofrecidos por los distintos fabricantes (ST Microelectronics, Texas instruments, etc) y finalmente, se escogerá aquel que mejor se adecúe a las necesidades del proyecto siendo los principales candidatos los de la familia ARM-M4 STM32F4x por su excelente relación prestaciones-coste.

Se valorará también la posibilidad de utilizar diferentes herramientas para la programación del microcontrolador y las alternativas open source en caso de existir.

Una vez hecho el diseño eléctrico de la tarjeta se procederá al diseño de una PCB, la cual se implementará utilizando tecnología SMD en su mayor parte. Para el diseño de la placa se utilizará KiCad por las numerosas ventajas que presenta al ser software libre y la gran cantidad de información que se puede encontrar sobre el funcionamiento del mismo. Tras depurar la PCB, se implementará un sencillo firmware que permita testear

el hardware diseñado y hacer una adquisición básica utilizando la tarjeta SAD utilizando los distintos interfaces implementados.

Adicionalmente se pondrá en marcha un programa para el ordenador basado en LabView donde presentar los datos recibidos.

1.2. Base teórica

Antes de empezar a desarrollar el dispositivo ya mencionado es indispensable realizar una investigación previa que debe abarcar desde el origen de las señales que se quieren adquirir hasta el

Partes a redactar de esta sección:

- base física/química de las señales del cerebro
- tipos de señales:
 - características físicas de las señales
 - información asociada a cada tipo
- posiciones donde se pueden medir

2

Estado del Arte

Con el paso del tiempo se ha demostrado que una de nuestras mayores virtudes como seres humanos es la habilidad de aprovechar el saber cultivado por otras personas para realizar nuevos descubrimientos con mayor facilidad. En la actualidad con la ayuda de Internet esta ventaja se ha visto potenciada hasta límites insospechados.

Como se ha mencionado con anterioridad en el capítulo 1, a lo largo de los años se han desarrollado numerosas alternativas a los dispositivos presentes en los hospitales y laboratorios utilizados normalmente para el estudio del cerebro.

Aunque se han invertido muchos recursos en estos dispositivos, el objetivo es permitir ampliar el número de personas capaces de estudiar el cerebro humano, consiguiendo así aumentar las posibilidades de mejorar nuestro conocimiento sobre el mismo.

De esta forma debería ser más fácil realizar nuevos descubrimientos como, por ejemplo, encontrar nuevas formas de diagnosticar enfermedades o de realizar una comunicación hombre-máquina para aquellas personas que por un motivo u otro no pueden utilizar los medios convencionales.

A lo largo de este capítulo se presentarán algunos de los dispositivos capaces de capturar un EEG haciendo uso de electrodos, algunos a nivel personal, otros enfocados a la docencia y, por supuesto, algunos diseñados por empresas con el fin de realizar un producto final que vender a terceros.

Aunque éstos dispositivos pueden presentar características muy diversas en función de la persona que los crea y el objetivo del mismo, normalmente se pueden dividir en dos grandes grupos. Dependiendo del tipo de electrodo que se utilice para captar las señales se hablará de dispositivos basados en electrodos húmedos o en electrodos secos.

2.1. Tipos de electrodos

Los electrodos hacen la función de interfaz adaptadora entre los distintos medios por los que se transmiten las señales.

Rellenar hablando de como son los electrodos, cómo se suelen usar, alguna imagen donde se vea un electrodo y algún esquema eléctrico.

Comparar los electrodos con la función de los huesos del oído al adaptar la señal acústica para que llegue mejor al oído.

2.1.1. Electrodos húmedos

Los electrodos húmedos,

IMAGEN de ejemplo de electrodos húmedos.

Ventajas e inconvenientes.

2.1.2. Electrodos secos

IMAGEN de ejemplo de electrodos húmedos.

Ventajas e inconvenientes.

2.2. Dispositivos similares

2.2.1. Proyectos personales

En internet se pueden encontrar algunos ejemplos de personas que han dedicado su tiempo a crear dispositivos capaces de captar un EEG...

Hablar de los códigos accesibles en distintas páginas web, github y otros sitios.

Explicar que me he basado en ellos para agilizar el diseño ya que las definiciones de los distintos registros son similares.

2.2.2. Proyectos docentes

Hablar del de Nerea, como se ha trabajado con el y en que se basa.

2.2.3. Comerciales

Ejemplos comerciales como zanna u otras empresas.

Sistemas BCI comerciales.

Claramente todos los ejemplos anteriores presentan un coste bastante dispar entre ellos costando desde los cientos de euros de los proyectos personales y docentes hasta algunos miles de euros en el caso de productos comerciales.

Historia procesadores (Gráfica de procesadores) Antecedentes de la placa (Open BCI)

3

Diseño

Este proyecto consiste en una ampliación y cambio de enfoque de otro proyecto llevado a cabo de manera simultánea por una alumna de la Universidad Politécnica de Madrid llamada Nerea Urrestarazu que a su vez se basa en el Kit de demostración de rendimiento del ADS1299 proporcionado por Texas Instrument.

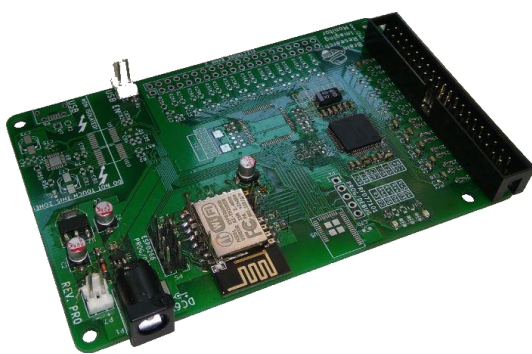


Figura 3.1: Placa final del proyecto base

3.1. Diseño base

El proyecto original trata sobre el diseño y desarrollo de una placa de adquisición de EEG haciendo uso de los integrados ADS1299 junto con un sistema de transmisión hacia el ordenador tanto inalámbricamente como a través de USB. La figura 3.2 muestra las partes que componen dicho diseño.

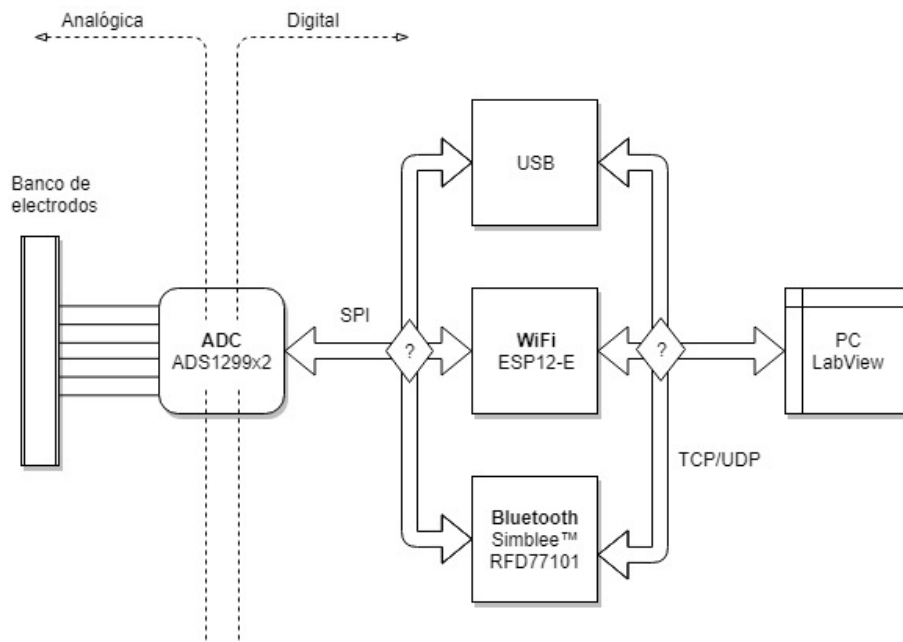


Figura 3.2: Esquema del proyecto base

3.2. Adquisición de datos

La parte encargada de la adquisición está compuesta por un par de bancos de electrodos dispuestos en los laterales de la placa seguidos de un filtro paso-bajo con frecuencia de corte de 6.79kHz encargado de eliminar las componentes de frecuencias muy altas, no deseadas en el estudio de un Electroencefalograma (EEG). A continuación se encuentran conectados a sus respectivos bancos los Convertidores Analógico-Digital (ADC) ADS1299. Estos convertidores son capaces de adquirir información de forma independiente o en modo “Daisy Chain” y transmitirla a través de Serial Peripheral Interface (SPI) hacia otros dispositivos cuya misión será gestionarla.



Figura 3.3: Convertidor Analógico-Digital ADS1299

El SPI presente en el convertidor permite leer todos los registros del ADS y escribir la gran mayoría. Aunque normalmente se leen los relacionados con los datos convertidos,

también es posible saber el estado de los General Purpose Input/Output (GPIO) o el identificador único del dispositivo leyendo su registro asociado.

La configuración del ADS se realiza mediante la escritura de ciertos registros, cada uno asociado a un parámetro específico. La tabla 3.1 muestra los registros disponibles, tanto de lectura como de configuración, una descripción básica y la dirección de memoria asociada a los mismos.

ADDRESS	REGISTER	DEFAULT SETTING	REGISTER BITS							
			7	6	5	4	3	2	1	0
Read Only ID Registers										
00h	ID	xxh	REV_ID[2:0]			1	DEV_ID[1:0]		NU_CH[1:0]	
Global Settings Across Channels										
01h	CONFIG1	96h	1	DAISY_EN	CLK_EN	1	0	DR[2:0]		
02h	CONFIG2	C0h	1	1	0	INT_CAL	0	CAL_AMP0	CAL_FREQ[1:0]	
03h	CONFIG3	60h	PD_REFBUF	1	1	BIAS_MEAS	BIASREF_INT	PD_BIAS	BIAS_LOFF_SENS	BIAS_STAT
04h	LOFF	00h	COMP_TH[2:0]			0	ILEAD_OFF[1:0]		FLEAD_OFF[1:0]	
Channel-Specific Settings										
05h	CH1SET	61h	PD1	GAIN1[2:0]			SRB2	MUX1[2:0]		
06h	CH2SET	61h	PD2	GAIN2[2:0]			SRB2	MUX2[2:0]		
07h	CH3SET	61h	PD3	GAIN3[2:0]			SRB2	MUX3[2:0]		
08h	CH4SET	61h	PD4	GAIN4[2:0]			SRB2	MUX4[2:0]		
09h	CH5SET ⁽¹⁾	61h	PD5	GAIN5[2:0]			SRB2	MUX5[2:0]		
0Ah	CH6SET ⁽¹⁾	61h	PD6	GAIN6[2:0]			SRB2	MUX6[2:0]		
0Bh	CH7SET ⁽²⁾	61h	PD7	GAIN7[2:0]			SRB2	MUX7[2:0]		
0Ch	CH8SET ⁽²⁾	61h	PD8	GAIN8[2:0]			SRB2	MUX8[2:0]		
0Dh	BIAS_SENSP	00h	BIASP8 ⁽²⁾	BIASP7 ⁽²⁾	BIASP6 ⁽¹⁾	BIASP5 ⁽¹⁾	BIASP4	BIASP3	BIASP2	BIASP1
0Eh	BIAS_SENSN	00h	BIASN8 ⁽²⁾	BIASN7 ⁽²⁾	BIASN6 ⁽¹⁾	BIASN5 ⁽¹⁾	BIASN4	BIASN3	BIASN2	BIASN1
0Fh	LOFF_SENSP	00h	LOFFP8 ⁽²⁾	LOFFP7 ⁽²⁾	LOFFP6 ⁽¹⁾	LOFFP5 ⁽¹⁾	LOFFP4	LOFFP3	LOFFP2	LOFFP1
10h	LOFF_SENSN	00h	LOFFM8 ⁽²⁾	LOFFM7 ⁽²⁾	LOFFM6 ⁽¹⁾	LOFFM5 ⁽¹⁾	LOFFM4	LOFFM3	LOFFM2	LOFFM1
11h	LOFF_FLIP	00h	LOFF_FLIP8 ⁽²⁾	LOFF_FLIP7 ⁽²⁾	LOFF_FLIP6 ⁽¹⁾	LOFF_FLIP5 ⁽¹⁾	LOFF_FLIP4	LOFF_FLIP3	LOFF_FLIP2	LOFF_FLIP1
Lead-Off Status Registers (Read-Only Registers)										
12h	LOFF_STATP	00h	IN8P_OFF	IN7P_OFF	IN6P_OFF	IN5P_OFF	IN4P_OFF	IN3P_OFF	IN2P_OFF	IN1P_OFF
13h	LOFF_STATN	00h	IN8M_OFF	IN7M_OFF	IN6M_OFF	IN5M_OFF	IN4M_OFF	IN3M_OFF	IN2M_OFF	IN1M_OFF
GPIO and OTHER Registers										
14h	GPIO	0Fh	GPIOD[4:1]				GPIOC[4:1]			
15h	MISC1	00h	0	0	SRB1	0	0	0	0	0
16h	MISC2	00h	0	0	0	0	0	0	0	0
17h	CONFIG4	00h	0	0	0	0	SINGLE_SHOT	0	PD_LOFF_COMP	0

Tabla 3.1: Tabla de registros de la familia ADS

Una descripción más detallada de cada uno de los bits de cada registro se puede encontrar en el *datasheet* del componente.

Como se puede ver en la tabla 3.1, los convertidores cuentan con una gran cantidad de opciones de configuración. Para el desarrollo de este proyecto se ha implementado un sistema de configuración que permite cambiar el valor de todos los registros.

3.3. Transmisión de datos

Una vez se ha capturado y convertido la información es necesario transmitirla, para ello la placa original contaba con dos alternativas. La primera consiste en, mediante Universal Serial Bus (USB) y acopladores aislantes, transmitir la información a un ordenador.

La segunda hace uso de dos tecnologías inalámbricas distintas que funcionan de forma excluyente, seleccionables con un *jumper*: WiFi o Bluetooth.

3.3.1. WiFi

Para la transmisión de datos a través de WiFi se seleccionó el módulo ESP12-E, basado en el System on Chip (SoC) ESP2866, también conocido nodemcu.

Este cuenta con un microcontrolador embebido de 32 bits (Tensilica L106) con una memoria Random Access Memory (RAM) de 36kB y una velocidad de reloj de la Central processing unit (USB) de hasta 80MHz, proporcionando suficiente potencia para las tareas básicas.

Así mismo se incluye montado en el mismo paquete una memoria flash de 4MB en la que almacenar el código de los programas que se ejecutarán.



Figura 3.4: ESP8266

A efectos de diseño es muy importante saber cuales serán las entradas/salidas del dispositivo así como los pines dedicados para su programación. La figura 3.5 muestra un resumen de todas las funciones de cada uno de los pines. Como se puede observar, el SPI hace uso de los pines 5, 6, 7 y 16 de modo que dichos pines deberán reservarse posteriormente en la fase de diseño de la Print Board Circuit (PCB).

El dispositivo tiene tres modos de arranque dependiendo del sitio desde el que cargue el código y la selección de uno u otro modo viene determinada por los pines MTDO, GPIO0 y GPIO2.

La tabla 3.2 resume los distintos modos de arranque así como el estado en el que debe estar cada uno de los pines para entrar en ese modo.

MTDO	GPIO0	GPIO2	Modo	Descripción
L	L	H	UART	Descarga el código desde UART
L	H	H	Flash	Carga desde memoria Flash a través de SPI
H	x	x	SDIO	Carga desde una tarjeta SD

Tabla 3.2: Modos de arranque del ESP12-E

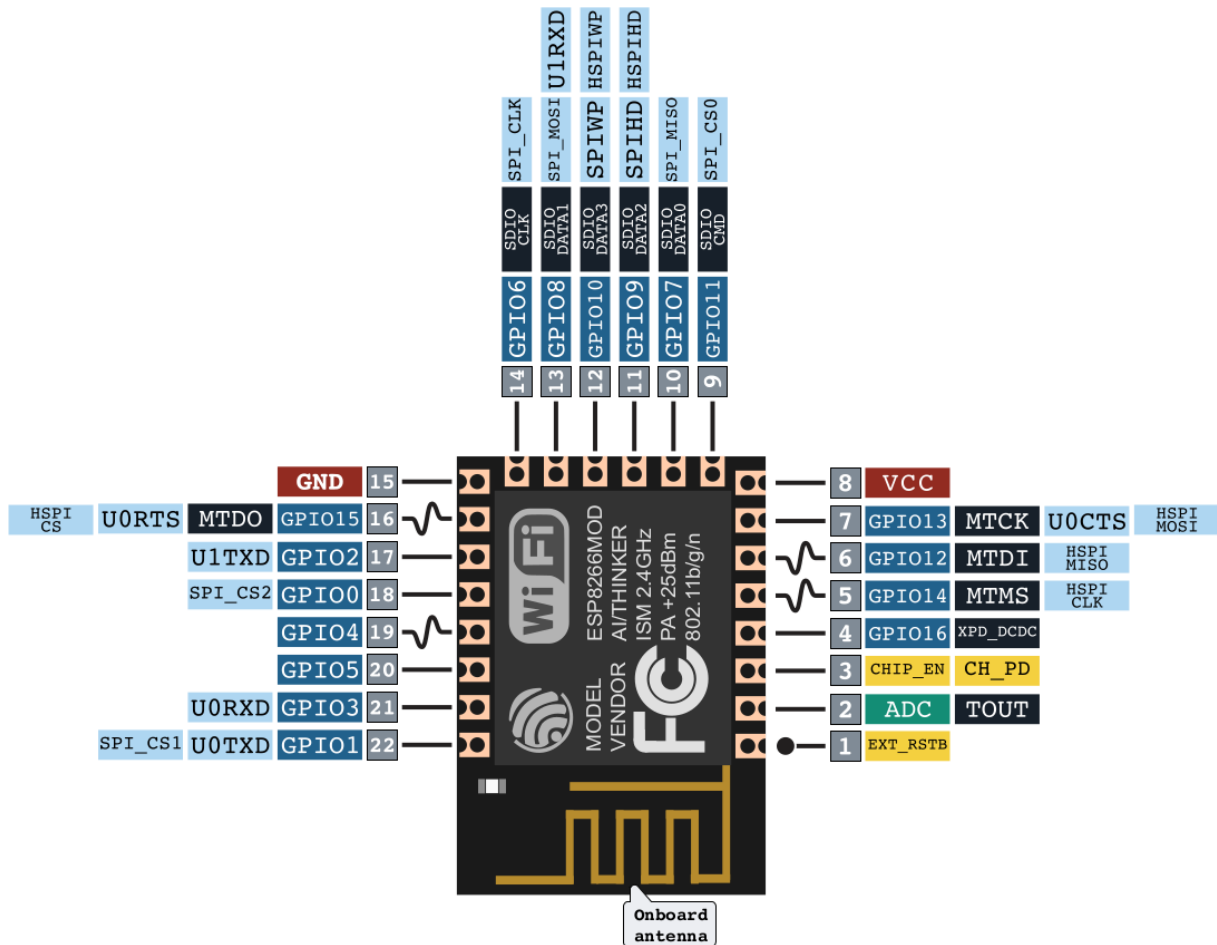


Figura 3.5: Resumen de todas las Entradas/Salidas del ESP12-E

3.3.2. Bluetooth

3.3.3. USB

Como este proyecto tiene como objetivo independizar el sistema lo máximo posible del ordenador se ha optado por desestimar el sistema de transmisión por USB conservando solamente la interfaz inalámbrica.

Hablar de la placa de Nerea y cómo la haces inteligente

Selección del STM

Diseño de la placa

Comunicación con la otra placa (sandwich) vs Diseño de cero Alimentación Interfaces

4

Implementación

TODO: Implementación

Hardware PCB (Añadir BOM)

Primeras pruebas y programación

Software Comunicación ADS - STM

Comunicación STM- ESP

Arduino (Comunicación ESP - PC)

5

Resultados

TODO: Resultados

Gráficas, lecturas...

6

Conclusiones

TODO: Conclusiones sobre el trabajo realizado

Valoración del trabajo. Partes positivas, negativas y posibles mejoras.

Apéndices



Ejemplos de bloques y comandos útiles en LaTeX

A.1. Ejemplo de sección

Citamos el acrónimo PCB.

Bitstream es una secuencia de bits.

La figura A.1 se utiliza en la portada.



Figura A.1: Logo de la Universidad Politécnica de madrid.

Código A.1: Algoritmo de ordenación Quicksort

```
#include <stdio.h>

void quick_sort (int *a, int n) {
    int i, j, p, t;
    if (n < 2)
        return;
    p = a[n / 2];
    for (i = 0, j = n - 1;; i++, j--) {
        while (a[i] < p)
            i++;
        while (p < a[j])
            j--;
        if (i >= j)
            break;
        t = a[i];
        a[i] = a[j];
        a[j] = t;
    }
    quick_sort(a, i);
    quick_sort(a + i, n - i);
}
```

```
#include <stdio.h>

void quick_sort (int *a, int n) {
    int i, j, p, t;
    if (n < 2)
        return;
    p = a[n / 2];
    for (i = 0, j = n - 1;; i++, j--) {
        while (a[i] < p)
            i++;
        while (p < a[j])
            j--;
        if (i >= j)
            break;
        t = a[i];
        a[i] = a[j];
        a[j] = t;
    }
    quick_sort(a, i);
    quick_sort(a + i, n - i);
}
```

La ecuación de Euler ($e^{\pm i\theta} = \cos \theta \pm i \sin \theta$) es citada frecuentemente como un ejemplo de belleza matemática.

$$a^2 + b^2 = c^2 \tag{A.1}$$