

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Proyecto Fin de Carrera*

**DESARROLLO DE UN SISTEMA PORTABLE  
DE BAJO COSTE PARA LA  
MONITORIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE  
PROCESOS DE SOLDADURA**

(Development of a low cost portable system for  
on-line welding monitoring)

Para acceder al Título de

**INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN**

Autor: Álvaro Gómez San Emeterio  
Octubre – 2012



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

## **INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN**

### **CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Realizado por: Álvaro Gómez San Emeterio**

**Director del PFC: Jesús M<sup>a</sup> Mirapeix Serrano**

**Título:** “Desarrollo de un sistema portable de bajo coste para la monitorización en tiempo real de procesos de soldadura”

**Title:** “Development of a low cost portable system for on-line welding monitoring”

**Presentado a examen el día: 2 de Octubre de 2012**

para acceder al Título de

### **INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN, ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Cobo García, Adolfo

Secretario (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús M<sup>a</sup>

Vocal (Apellidos, Nombre): Domingo Gracia, Marta

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC  
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº  
(a asignar por Secretaría)

# AGRADECIMIENTOS

A pesar de que mis sentimientos van más allá de unas meras líneas sobre una hoja de papel, con estas palabras quisiera mostrar mi gratitud y mi alegría por compartir o haber compartido mi vida con todas las personas que han hecho posible que hoy en día sea la persona que soy.

A mis padres, Santi y Pili, por ser el faro que ilumina mi vida desde que nací.

Al resto de mi familia por la sensación de orgullo que recorre mi cuerpo al poder decir que pertenezco a ella. Y en especial a mi abuelita Toñina por esas tortillas tan ricas.

A mis amigos y amigas, por todos los momentos (buenos y malos) que hemos vivido y por los que nos quedan por vivir. Y en especial a Rubén por todo lo que ha hecho por mí desde que nos conocemos.

A Lucía por estar siempre ahí.

A Jesús por ser tan agradable y darme la oportunidad de aprender tanto con este proyecto.

A José por la paciencia que ha demostrado conmigo al ayudarme en todo momento, porque sin él este proyecto nunca hubiese sido posible.

Y a todo el Grupo de Ingeniería Fotónica por ser tan amables conmigo desde el primer día.

Y por último pero no menos importante, a todos mis compañeros de la Universidad por estos inolvidables años que hemos compartido y compartiremos...

*“Todo esfuerzo tiene su recompensa”*

(Mis padres)

# INDICE

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>página 1</b>
1.1. Contexto	página 1
1.2. Objetivos	página 2
<b>Capítulo 2. Introducción teórica</b>	<b>página 3</b>
2.1. Soldadura	página 3
2.1.1. Introducción	página 3
2.1.2. Historia de la soldadura	página 4
2.1.3. Tipos de soldadura y aplicación actual	página 6
2.1.3.1. Soldadura por arco eléctrico	página 6
2.1.3.2. Soldadura láser	página 9
2.1.4. Defectos de soldadura	página 11
2.2. Estado del arte	página 13
2.2.1. Técnicas de monitorización en tiempo real	página 13
2.2.1.1. Sensores eléctricos	página 14
2.2.1.2. Termografía infrarroja	página 14
2.2.1.3. Emisión acústica	página 15
2.2.2. Técnicas ópticas: espectrómetros	página 15
2.2.3. Técnicas ópticas: fotodiodos	página 16
<b>Capítulo 3. Diseño de la electrónica</b>	<b>página 18</b>
3.1. Introducción	página 18
3.2. Diseño de la electrónica	página 19
3.2.1. Estudio previo de circuitos	página 19
3.2.2. Diseño con <i>DesignSpark PCB</i>	página 26
3.2.2.1. Introducción	página 26
3.2.2.2. FEZ Photodiodes V1.0	página 27
3.2.2.3. FEZ Photodiodes V2.0	página 36
3.2.3. Caracterización de los circuitos en el laboratorio	página 40
3.2.3.1. FEZ Photodiodes V1.0	página 40
3.2.3.2. FEZ Photodiodes V2.0	página 44
<b>Capítulo 4. Ensayos experimentales</b>	<b>página 49</b>
4.1. Introducción	página 49
4.2. Circuito 1	página 51

4.3. Circuito 2	página 57
4.4. Circuito 3	página 60
<b>Capitulo 5. Conclusiones</b>	<b>página 63</b>
5.1. Líneas futuras	página 64
<b>Anexo</b>	<b>página 65</b>
<b>Referencias</b>	<b>página 68</b>

# FIGURAS Y ECUACIONES

Figura 2.1	página 3
Figura 2.2	página 4
Figura 2.3	página 5
Figura 2.4	página 7
Figura 2.5	página 8
Figura 2.6	página 10
Figura 2.7	página 12
Figura 2.8	página 14
Figura 2.9	página 15
Figura 2.10	página 17
Figura 3.1	página 19
Figura 3.2	página 20
Figura 3.3	página 20
Figura 3.4	página 21
Figura 3.5	página 21
Figura 3.6	página 22
Figura 3.7	página 22
Figura 3.8	página 23
Figura 3.9	página 23
Figura 3.10	página 24
Figura 3.11	página 25
Figura 3.12	página 25
Figura 3.13	página 25
Figura 3.14	página 27
Figura 3.15	página 28
Figura 3.16	página 29
Figura 3.17	página 31
Figura 3.18	página 32
Figura 3.19	página 33
Figura 3.20	página 34
Figura 3.21	página 35
Figura 3.22	página 35
Figura 3.23	página 36
Figura 3.24	página 37
Figura 3.25	página 37
Figura 3.26	página 38
Figura 3.27	página 39
Figura 3.28	página 39
Figura 3.29	página 40

Figura 3.30	página 42
Figura 3.31	página 43
Figura 3.32	página 44
Figura 3.33	página 46
Figura 3.34	página 46
Figura 3.35	página 48
Figura 3.36	página 48
Figura 4.1	página 50
Figura 4.2	página 51
Figura 4.3	página 52
Figura 4.4	página 53
Figura 4.5	página 54
Figura 4.6	página 55
Figura 4.7	página 56
Figura 4.8	página 57
Figura 4.9	página 58
Figura 4.10	página 59
Figura 4.11	página 60
Figura 4.12	página 61
Figura 4.13	página 62

Ecuación 3.1	página 20
Ecuación 3.2	página 20
Ecuación 3.3	página 21
Ecuación 3.4	página 22
Ecuación 3.5	página 22
Ecuación 3.6	página 23
Ecuación 3.7	página 23
Ecuación 3.8	página 24
Ecuación 3.9	página 28
Ecuación 3.10	página 29
Ecuación 3.11	página 47

# 1 - INTRODUCCIÓN

## 1.1 Contexto

La soldadura por arco y láser son procesos de fabricación continuamente empleados en el área industrial, como por ejemplo en el sector del automóvil, el sector aeronáutico o el nuclear. En algunos de ellos, en función de las especificaciones y particularidades de cada proceso, el control de la calidad de las soldaduras puede llegar a ser muy importante, puesto que un pequeño defecto podría dar lugar a graves consecuencias.

En un proceso de soldadura resulta muy difícil evitar la aparición de defectos puesto que es un proceso muy complejo en el que numerosos parámetros de entrada han de ser controlados, como por ejemplo la tensión y corriente de soldadura, la velocidad de avance, la temperatura y humedad del ambiente, la limpieza de las piezas a soldar, el flujo del gas de protección, etc.. Por ello, es necesario realizar numerosas pruebas para determinar los rangos óptimos de dichos parámetros a través de muchos ensayos y pruebas en el laboratorio. A pesar de que se hayan fijado los rangos óptimos de dichos parámetros, sigue existiendo la posibilidad de que aparezcan defectos durante el proceso. Esto ha motivado que existan muchas investigaciones sobre las técnicas de monitorización de la calidad de la soldadura en tiempo real para garantizar la calidad de los procesos e incluso para poder ejercer un control realimentado sobre éstos.

En la práctica, para comprobar que una soldadura está libre de defectos se deben de realizar múltiples estudios, en ocasiones sujetos a normas y certificaciones específicas. Para ello, y una vez finalizada la soldadura, se procede a realizar ensayos no destructivos (NDT). Los NDT comprueban que durante el proceso de soldadura no hayan aparecido imperfecciones, normalmente pre-establecidas, en las piezas. Las técnicas de NDT van desde los rayos- X a los líquidos penetrantes pasando por ultrasonidos y otras técnicas análogas [1].

Este tipo de técnicas no destructivas son muy eficaces para comprobar los posibles defectos pero a la vez son técnicas típicamente lentas y que implican un coste relevante. Además son procesos que se realizan *off-line* una vez que se ha finalizado el proceso, por lo tanto no se puede actuar en tiempo real sobre ningún parámetro ni tratar de corregir el defecto que se está produciendo.

Existe en la industria un gran interés por disponer de sistemas de monitorización de la calidad en el proceso de soldadura en tiempo real, puesto que abre un gran abanico de posibilidades para detectar y corregir los defectos.

Estos sistemas permiten detectar en tiempo real los defectos mientras se realiza el proceso y, por ejemplo, podrían permitir corregir la soldadura in situ o también si se desea se podrían descartar cordones defectuosos, obteniendo de esta manera un mayor control sobre el proceso. Por lo tanto, es obvio que con estas técnicas pueden conseguirse ahorros de costes y reducción de tiempos de producción, ello conlleva una mejora de la productividad y del rendimiento, dos factores muy importantes en la actualidad.

A partir de estas ideas han ido apareciendo distintas técnicas para la monitorización en tiempo real de procesos de soldadura láser y de arco. Algunas de estas técnicas son la medición de la tensión de carga inducida, el análisis de las emisiones acústicas generadas durante el proceso de soldadura, o el procesamiento de la imagen por medio de la visión artificial o termografía infrarroja. Otras técnicas basadas en procesos ópticos son el uso de la espectroscopía óptica de plasmas o el análisis de la radiación óptica generada a través de fotodiodos.

Ésta última técnica óptica de monitorización en tiempo real del proceso de soldadura tiene la ventaja de ser un sistema no invasivo puesto que está basado en la captación de la luz a través de una fibra óptica conectada a un fotodiodo y por lo tanto es inmune a las interferencias electromagnéticas de gran relevancia en este ámbito.

## 1.2 Objetivos

En la actualidad los sistemas utilizados típicamente para el control de los parámetros de la soldadura en tiempo real por medio de la espectroscopía óptica de plasmas se basan en el uso de espectrómetros.

En este proyecto de fin de carrera el objetivo es lograr resultados similares a los obtenidos con este *setup* “estándar” sustituyendo el espectrómetro por fotodiodos. Hay que tener en cuenta que éstos presentan un coste muy inferior, lo que puede aportar otra vía para el control de parámetros de soldadura en tiempo real de manera más eficiente.

Para ello se estudiarán diferentes opciones de electrónica para el control y el tratamiento de la señal proporcionada por dichos fotodiodos. Por lo tanto se realizará el diseño y montaje de diferentes placas, todas ellas “montadas” sobre una placa hardware *opensource* de bajo coste (placa FEZ Domino [2]) que permite su programación mediante el entorno .NET de Microsoft. Finalmente se realizarán diversas pruebas experimentales en el laboratorio para la validación y comparación de las opciones propuestas.

## 2 – INTRODUCCIÓN TEÓRICA

### 2.1 SOLDADURA

#### 2.1.1 INTRODUCCIÓN

Una soldadura es por definición la unión de dos o más piezas metálicas llevada a cabo mediante la aplicación de calor en los bordes de unión, llegando a veces (dependiendo del procedimiento utilizado) al punto de fusión de ambos bordes, para que al enfriarse y solidificarse se conviertan en una sola unidad metalúrgica. La soldadura se puede realizar con o sin aportación de material, dependiendo del espesor del material base, tipo de junta y el tipo de procedimiento empleado para la soldadura [3].



Figura 2.1 – Ejemplo de soldadura

Este proceso tiene gran relevancia en la sociedad debido a que en la elaboración de muchos de los objetos que se emplean en la vida cotidiana se utiliza la soldadura (automóviles, edificios y obra civil, tuberías de abastecimiento, etc.). Esta razón conlleva que se esté investigando activamente en este ámbito, y que se estén llevando a cabo grandes avances en técnicas para mejorar los procesos de soldadura.

La soldadura abarca una amplia variedad de aplicaciones, algunos ejemplos pueden ser el sector de la edificación, el automovilístico, el aeronáutico, el naval, el energético o el electrónico. Cada uno de estos sectores tienen sus propias características y por lo tanto cada soldadura tendrá diferentes parámetros y exigencias de control de calidad [4].

Básicamente existen dos formas básicas de soldadura: soldadura por fusión u homogénea y soldadura de fase sólida o heterogénea. La soldadura homogénea involucra la fusión de los metales que están siendo unidos mientras que la soldadura

heterogénea se define como el procedimiento que permite unir piezas metálicas con un metal de aporte fundido con temperatura de fusión inferior a la de una de las piezas y que “moje” el metal de base, que no participa por fusión en la formación de la unión.

## 2.1.2 HISTORIA DE LA SOLDADURA

La historia de la unión de los metales se remonta a la Edad del Bronce y a la Edad del Hierro en Europa y Oriente Medio. La Edad Media trajo novedades en cuanto a la soldadura mediante la fragua, por la que los herreros calentaban y golpeaban el metal hasta que ocurría la unión. Los artesanos del Renacimiento eran habilidosos en el proceso, y la industria continuó creciendo durante los siglos siguientes.

En 1800, Sir Humpry Davy descubrió el arco eléctrico, y de este modo, se continuó con las invenciones de los electrodos de metal por el ruso Nikolai Slavyanov.

Alrededor de 1900 A.P. Strohmenger lanzó un electrodo de metal recubierto en Gran Bretaña que dio un arco más estable, y en 1919, la soldadura de corriente alterna fue inventada por C.J. Hoslag, pero no llegó a ser popular.

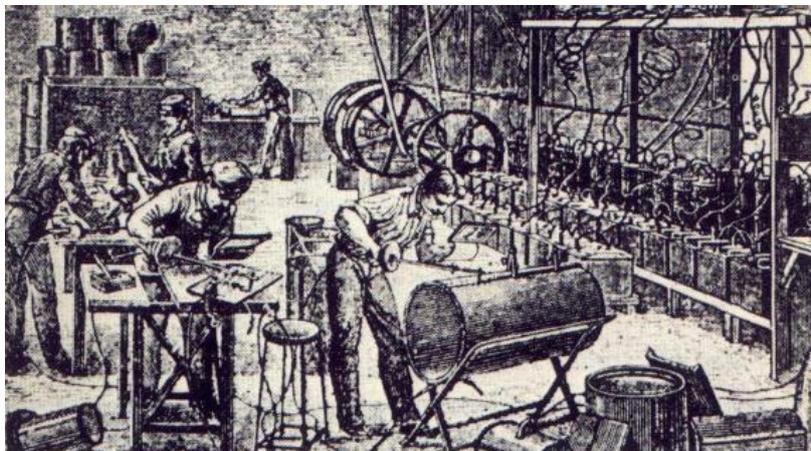


Figura 2.2 – Primeras soldaduras

La soldadura por resistencia también fue desarrollada durante las décadas finales del siglo XIX. La soldadura de termita fue inventada en 1893, y alrededor de ese tiempo, se estableció otro proceso, la soldadura a gas. El acetileno fue descubierto en 1836 por Edmund Davy, pero su uso en la soldadura no fue práctico hasta cerca de 1900, cuando fue desarrollado un soplete conveniente.

Al principio, la soldadura de gas fue uno de los más populares métodos de soldadura debido a su portabilidad y costo relativamente bajo. Sin embargo, a medida que progresaba el siglo XX bajó en las preferencias para las aplicaciones industriales.

La Primera Guerra Mundial causó un repunte importante en el uso de los procesos de soldadura, con las diferentes fuerzas militares procurando determinar cuáles de los varios procesos nuevos de soldadura serían los mejores, estableciéndose una rivalidad entre británicos y estadounidenses para el uso de las soldaduras de sus aviones o naves.

Durante los años 1920 se realizaron importantes avances en la tecnología de la soldadura. El gas de protección se convirtió en una gran novedad, mientras que los científicos procuraban proteger las soldaduras contra los efectos del oxígeno y el nitrógeno en la atmósfera. La porosidad y la fragilidad eran los problemas primarios, y las soluciones que desarrollaron incluyeron el uso del hidrógeno, argón y helio como atmósferas de soldadura. Durante la siguiente década, posteriores avances permitieron la soldadura de metales reactivos como el aluminio y el magnesio. Esto, conjuntamente con desarrollos en la soldadura automática, la corriente alterna, y los fundentes alimentaron una importante extensión de la soldadura de arco durante los años 1930 y entonces durante la Segunda Guerra Mundial.



Figura 2.3 – Soldadura manual

A mediados del siglo XX, fueron inventados muchos métodos nuevos de soldadura. 1930 vio el lanzamiento de la soldadura de perno, que pronto llegó a ser popular en la fabricación de naves y la construcción. La soldadura de arco sumergido fue inventada el mismo año, y continúa siendo popular hoy en día. En 1941,

después de décadas de desarrollo, la soldadura de arco de gas tungsteno fue finalmente perfeccionada, seguida en 1948 por la soldadura por arco metálico con gas, permitiendo la soldadura rápida de materiales no ferrosos pero requiriendo costosos gases de blindaje. La soldadura de arco metálico blindado fue desarrollada durante los años 1950, usando un fundente de electrodo consumible cubierto, y se convirtió rápidamente en el más popular proceso de soldadura de arco metálico. En 1957, debutó el proceso de soldadura por arco con núcleo fundente, en el que el electrodo de alambre auto blindado podía ser usado con un equipo automático, resultando en velocidades de soldadura altamente incrementadas, y ése mismo año fue inventada la soldadura de arco de plasma. La soldadura por electroescoria fue introducida en 1958, y fue seguida en 1961 por la soldadura por electrogas.

Otros desarrollos recientes en la soldadura incluyen en 1958 el importante logro de la soldadura por haz de electrones, haciendo posible la soldadura profunda y estrecha por medio de la fuente de calor concentrada. Siguiendo la invención del láser en 1960, la soldadura por rayo láser debutó varias décadas más tarde, y ha demostrado ser especialmente útil en la soldadura automatizada de alta velocidad. Sin embargo, ambos procesos continúan siendo altamente costosos debido al alto costo del equipo necesario, lo que ha limitado en cierta medida sus aplicaciones.

### **2.1.3 TIPOS DE SOLDADURA Y APLICACIÓN ACTUAL**

A continuación se explicarán dos tipos en concreto de soldadura como son soldadura por arco eléctrico y soldadura láser puesto que son los que están relacionados con este proyecto. Dentro de la soldadura por arco se profundizará más en la soldadura por arco en atmósfera inerte con electrodo refractario (método TIG) que es el método que ha sido utilizado en los ensayos experimentales.

#### **2.1.3.1 SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO**

En la actualidad, la soldadura eléctrica resulta indispensable para un gran número de industrias. Es un sistema de reducido coste, de fácil y rápida utilización, resultados perfectos y aplicables a toda clase de metales. Puede ser muy variado el proceso. El procedimiento de soldadura por arco consiste en provocar la fusión de los bordes que se desea soldar mediante el calor intenso desarrollado por un arco eléctrico. Los bordes en fusión de las piezas y el material fundido que se separa del electrodo se mezclan íntimamente, formando, al enfriarse, una pieza única, resistente y homogénea.

La soldadura por arco eléctrico puede realizarse empleando corriente continua o alterna. La tensión típica en corriente continua es de 25 a 30 voltios, pero para cebar el arco al comenzar la tensión ha de ser de 70 a 100 voltios; por este motivo es necesario intercalar una resistencia en serie que haga de regulador. La intensidad de corriente está comprendida entre 30 y 300 amperios, según la amplitud y la profundidad de la soldadura que se vaya a realizar. Las máquinas de corriente alterna para soldadura llevan un transformador que reduce la tensión de la red, generalmente de 220 voltios, a la de soldadura (inferior a 70 voltios). Estos equipos son más sencillos y económicos; por eso son los más empleados, sobre todo para algunos trabajos que se realizan en pequeños talleres.

Actualmente en la mayoría de sectores industriales la soldadura por arco eléctrico se realiza con procedimientos semiautomáticos o totalmente automáticos.

### SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

Utiliza un electrodo metálico continuo y desnudo. El arco se produce entre el alambre y la pieza bajo una capa de fundente granulado que se va depositando delante del arco. Tras la soldadura se recoge el fundente que no ha intervenido en la operación.

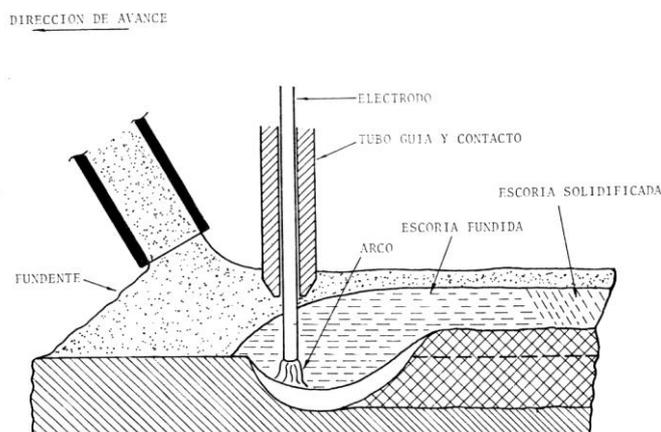


Figura 2.4 – Soldadura por arco sumergido

### SOLDADURA POR ARCO EN ATMÓSFERA INERTE

Este procedimiento se basa en aislar el arco y el metal fundido de la atmósfera, mediante un gas inerte (helio, argón, hidrógeno, anhídrido carbónico, etc.).

Existen varios procedimientos:

- Método TIG (Tungsten Inert Gas) (con electrodo refractario)

Se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente de tungsteno (wolframio). Dada la elevada resistencia a la temperatura de ambos componentes acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado. Los gases más utilizados para la protección del arco en esta soldadura son el argón y el helio, o mezclas de ambos.

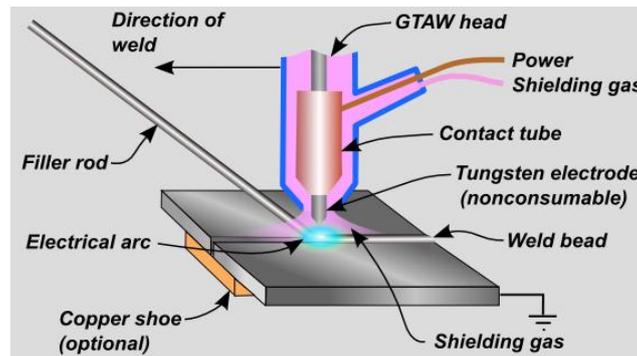


Figura 2.5 – Soldadura TIG

La gran ventaja de este método de soldadura es, básicamente, la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, ya que el gas protector impide el contacto entre el oxígeno de la atmósfera y el baño de fusión. Además, dicho gas simplifica notablemente el soldeo de metales ferrosos y no ferrosos, por no requerir el empleo de desoxidantes, con las deformaciones o inclusiones de escoria que pueden implicar. Otra ventaja de la soldadura por arco en atmósfera inerte es la que permite obtener soldaduras limpias y uniformes debido a la escasez de humos y proyecciones; la movilidad del gas que rodea al arco transparente permite al soldador ver claramente lo que está haciendo en todo momento, lo que repercute favorablemente en la calidad de la soldadura. El cordón obtenido es por tanto de un buen acabado superficial, que puede mejorarse con sencillas operaciones de acabado, lo que incide favorablemente en los costes de producción. Además, la deformación que se produce en las inmediaciones del cordón de soldadura es menor.

Como inconvenientes está la necesidad de proporcionar un flujo continuo de gas, con la subsiguiente instalación de tuberías, bombonas, etc., y el encarecimiento que supone. Además, este método de soldadura requiere una mano de obra muy especializada, lo que también aumenta los costes. Por tanto, no es uno de los métodos más utilizados sino que se reserva para uniones con necesidades especiales de acabado superficial y precisión.

De todas formas, hoy en día se está generalizando el uso de la soldadura TIG sobre todo en aceros inoxidable y especiales ya que a pesar del mayor coste de esta soldadura, el acabado obtenido es superior.

Las aplicaciones típicas son:

- Soldeo de la primera pasada de tuberías de aceros aleados, aceros inoxidable y aleaciones de Níquel.
- Soldeo de equipos de Al, Ti y aleaciones de Ni.
- Soldeo de tubos a la placa de los intercambiadores de calor
- Método MIG y MAG ( Con electrodo consumible )

Aquí se sustituye el electrodo refractario de wolframio por un hilo de alambre continuo y sin revestimiento que se hace llegar a la pistola junto con el gas. Según sea el gas así recibe el nombre, (MIG = Metal Inert Gas) o (MAG = Metal Active Gaswelding) si utiliza anhídrido carbónico que es más barato.

### 2.1.3.2 SOLDADURA LÁSER

La soldadura láser es el sistema de soldadura más preciso que existe en la actualidad y el que menos calor aporta. Mediante este procedimiento se permite la reparación de todo tipo de útiles, soldadura de piezas de espesores inferiores a 1mm, y todo tipo de unión o reparación de soldadura en el que se desee evitar deformaciones.

La soldadura por rayo (haz) láser (LBW, de laser-beam welding) es un proceso de soldadura por fusión que utiliza la energía aportada por un haz láser para fundir y recristalizar el material o los materiales a unir, obteniéndose la correspondiente unión entre los elementos involucrados. En la soldadura láser comúnmente no existe aportación de ningún material externo. La soldadura se realiza por el calentamiento de la zona a soldar, y la posterior aplicación de presión entre estos puntos. Normalmente la soldadura láser se efectúa bajo la acción de un gas protector, que suele ser helio o argón.

Mediante un sistema de espejos situados en el cabezal de soldadura se focaliza toda la energía del láser en una zona muy reducida del material. Cuando se llega a la temperatura de fusión, se produce la ionización de la mezcla entre el material vaporizado y el gas protector (formación de plasma). La capacidad de absorción energética del plasma es mayor incluso que la del material fundido, por lo que prácticamente toda la energía del láser se transmite directamente y sin pérdidas al material a soldar.

La elevada presión y elevada temperatura causadas por la absorción de energía del plasma, continúa mientras se produce el movimiento del cabezal arrastrando la "gota" de plasma rodeada con material fundido a lo largo de todo el cordón de soldadura.

Para controlar el espesor del cordón de soldadura, la anchura y la profundidad de la penetración se pueden utilizar otro tipo de espejos como son los espejos de doble foco.

De esta manera se consigue un cordón homogéneo y dirigido a una pequeña área de la pieza a soldar, con lo que se reduce el calor aplicado a la soldadura reduciendo así las posibilidades de alterar propiedades químicas o físicas de los materiales soldados.



Figura 2.6 – Soldadura láser

Debido a estas destacadas características la soldadura láser es muy utilizada en cualquier sector industrial que requiera soldadura para piezas de responsabilidad. Aunque también se usa para otros sectores en el que se requiere una soldadura de alta calidad. Los principales campos de trabajo de la soldadura láser son:

- Piezas de transmisión en la industria automotriz
- Piezas unitarias grandes y con buenos acabados
- Piezas de electrodomésticos
- Piezas para la industria aeronáutica de aluminio, titanio o níquel
- Industria del ferrocarril
- Recipientes a presión
- Industria alimentaria, a la hora de realizar embalaje de alimentos, cuchillas de corte
- Para instrumental médico y quirúrgico
- Odontología

## 2.1.4 DEFECTOS DE SOLDADURA

Cuando se realiza una soldadura pueden ocurrir numerosos tipos de defectos, a continuación se presentan los más comunes:

**1. Cordones defectuosos:** La forma en que el soldador conduce el electrodo, así como el correcto ajuste de la corriente para el diámetro empleado, son decisivos para el aspecto y la calidad de la costura terminada.

En los catálogos de electrodos está indicado el amperaje máximo que de ninguna manera debe excederse. Los amperajes normales son inferiores a estos valores en aproximadamente 20%.

**2. Entalladuras de penetración:** Son ocasionadas por incorrecta conducción del electrodo o por un amperaje demasiado elevado. Deben evitarse de todas maneras, ya que debilitan cualquier unión soldada.

**3. Consumo diagonal de los electrodos:** Se produce en caso de corriente continua, por efecto del soplo del arco. Para remediar este defecto se puede conectar un segundo cable de tierra entre la fuente de poder y la pieza de trabajo, teniendo en este caso que aplicar los dos cables en puntos lo más alejados en la pieza base.

**4. Porosidad en el cordón:** Puede tener origen muy diferente:

**a) Poros en los primeros centímetros de la costura:** Son producidos frecuentemente por electrodos húmedos que debido al calentamiento del electrodo durante la operación del soldeo, la humedad en el revestimiento se vaporiza, produciéndose la formación de poros. Los electrodos básicos tienen tendencia a la formación de poros iniciales, en caso de soldar con arco demasiado largo. También pueden presentarse poros al haber contacto con un electrodo de revestimiento básico en una base completamente fría.

**b) Poros al final del cordón:** Se presentan, cuando se suelda el electrodo con sobrecarga de corriente, calentándose por esta razón hasta la temperatura de ebullición del alambre. Puede evitarse reduciendo el amperaje.

**c) Poros que se presentan en forma regular sobre toda la longitud del cordón:** La causa reside generalmente en el material base. Por ejemplo, aceros con alto contenido de azufre o fósforos no pueden soldarse libres de poros cuando se usan electrodos con revestimiento ácido. En muchos casos el remedio es usar electrodos básicos.

**d) Nidos de poros no visibles en la superficie:** Se deben, por lo general, a un manejo incorrecto del electrodo. Por una oscilación demasiado pronunciada o una separación excesiva entre los bordes de las planchas a soldar, el metal de aporte se solidifica por acceso del aire e insuficiente protección de la escoria, volviéndose poroso.

**5. Grietas en el cordón:** Estas rajaduras pueden ser ocasionadas casi siempre por los siguientes motivos:

**a) Sobrepasar el límite de resistencia de la costura:** Debido a esfuerzos en la pieza de trabajo, lo que ocurre con especial frecuencia en objetos de forma complicada fuertemente estriados y con paredes de gran espesor. Cambiando la secuencia de soldadura o mediante cambios de construcción puede evitarse tales defectos.

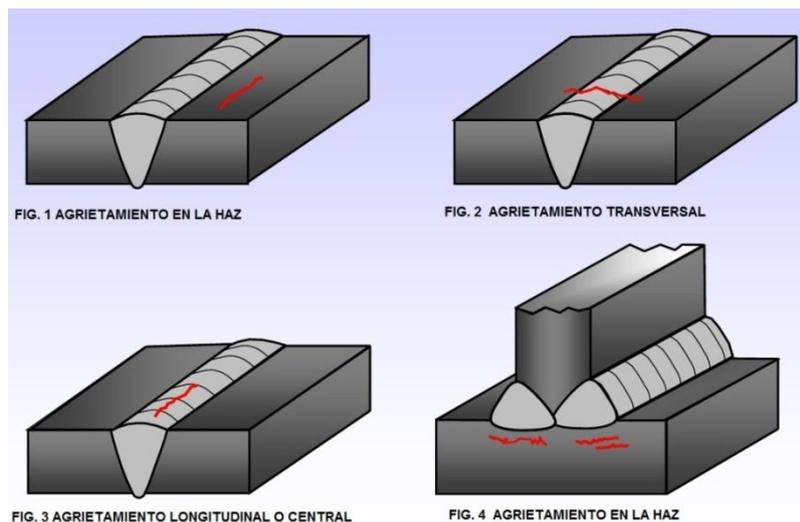


Figura 2.7 – Agrietamiento en el cordón

**b) Inadecuada selección del electrodo:** Todos los aceros con más de 0,25% de C (Resistencia algo mayor que  $52\text{Kg/mm}^2$ ) pueden soldarse con garantías sólo con electrodos básicos. Electrodos con revestimiento ácido producen en estos materiales rajaduras. Los aceros con más de 0,6% de carbono son soldables solo con cierta reserva, es decir habrá que usar electrodos especiales.

Igualmente se requiere gran cuidado en el caso de piezas de fundición de acero.

**c) Empleo inadecuado de electrodos con revestimiento ácido:** Por razones ya mencionadas, estos tipos de electrodos no deben emplearse para el cordón de

raíz en soldaduras de capas múltiples y tampoco en trabajos de apuntalado. Igualmente, pueden ocasionar fisuras en el cordón los aceros con contenido de azufre o fósforo (p. ej. aceros para trabajos en tornos automáticos).

Como se puede observar, hoy en día es fundamental contar con una monitorización en tiempo real de la soldadura puesto que, idealmente, sería posible detectar todos estos fallos mientras se realiza la soldadura. Si se automatizase la soldadura con dicha monitorización se dispondría en tiempo real información del proceso, pudiéndose tomar las medidas oportunas *in-situ*, como puede ser descartar la pieza o corregir los parámetros afectados. De esta forma se aumentaría el rendimiento y la productividad, reduciendo costes como la reparación de los defectos de la soldadura fuera de la línea de producción.

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se va a hablar sobre las diferentes técnicas de monitorización en tiempo real que existen, haciendo mención especial en las técnicas que más interesan como son las basadas en la espectroscopía óptica de plasmas por medio de espectrómetros y fotodiodos.

Actualmente, para evitar riesgos y garantizar la seguridad de la soldadura se emplean ensayos no destructivos (NDT). Los NDT son un tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

Pero debido a la necesidad de abaratar costes y reducir la lentitud de estos ensayos existe un gran interés por perfeccionar técnicas de monitorización en tiempo real, como las que se mencionarán en el siguiente apartado.

### 2.2.1 TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN EN TIEMPO REAL

La importancia que tiene hoy en día los procesos de soldadura está obligando a la incorporación de sistemas de control en línea para garantizar los estándares de calidad del proceso. Éstas son algunas de las técnicas utilizadas:

### 2.2.1.1 SENSORES ELÉCTRICOS

Para los procesos más simples es posible detectar defectos relativamente básicos a través de sensores eléctricos. Esta operación se realiza a través del control de la tensión en máquinas de soldadura de auto-regulador para soldeo, ya que la tensión del arco indica claramente su longitud. Mientras que para las máquinas de soldadura plana, el control de la longitud del arco debe hacerse mediante la intensidad de la corriente.

Esta técnica tiene el inconveniente de no ser muy útil para piezas de un grosor medio o alto. Por otro lado esta técnica sufre los efectos de las fuertes interferencias electromagnéticas, sobre todo al inicio del proceso de soldadura. Por último, la defectología que es posible detectar mediante este tipo de soluciones es limitada.

### 2.2.1.2 TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La termografía infrarroja es una técnica que permite ver la temperatura de una superficie con precisión sin tener que tener ningún contacto con ella. Gracias a la Física podemos convertir las mediciones de la radiación infrarroja en mediciones de temperatura. Con esta técnica es posible medir la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético del plasma que desprende la soldadura, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas, y de este modo controlar el proceso de soldadura.

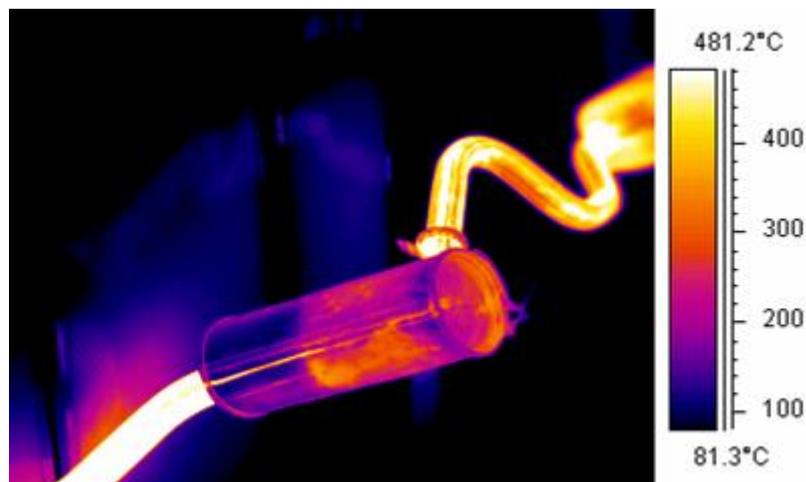


Figura 2.8 – Ejemplo de termografía infrarroja en instalaciones industriales

Esta técnica tiene como inconveniente el elevado coste que supone su implementación y la complejidad de su monitorización en tiempo real.

### 2.2.1.3 EMISIÓN ACÚSTICA

La definición formal de la Emisión Acústica es “La clase de fenómeno en el cual se generan ondas elásticas mediante la liberación rápida de energía desde fuentes localizadas en un material.” Por lo tanto esta técnica estudia las emisiones acústicas producidas por las fluctuaciones de alta frecuencia del plasma y por el proceso de solidificación de la pieza.

En general, las soldaduras presentes en casi cualquier componente pueden ser inspeccionadas mediante el método de emisión acústica, incluyendo soldadura laser y soldadura de arco.

### 2.2.2 TÉCNICAS ÓPTICAS: ESPECTRÓMETROS

Un espectrómetro (también llamado espectroscopio o espectrógrafo) es un instrumento óptico que se usa para medir las propiedades de la luz sobre una porción específica del espectro electromagnético. La variable medida es generalmente la intensidad de la luz, pero también podría ser, por ejemplo, el estado de polarización. La variable independiente es, por lo general, la longitud de onda de la luz, que suele expresarse como una fracción de metro, aunque a veces se expresa como una unidad directamente proporcional a la energía del fotón, tales como el número de onda o los voltios de los electrones (que tiene una relación recíproca a la longitud de onda).

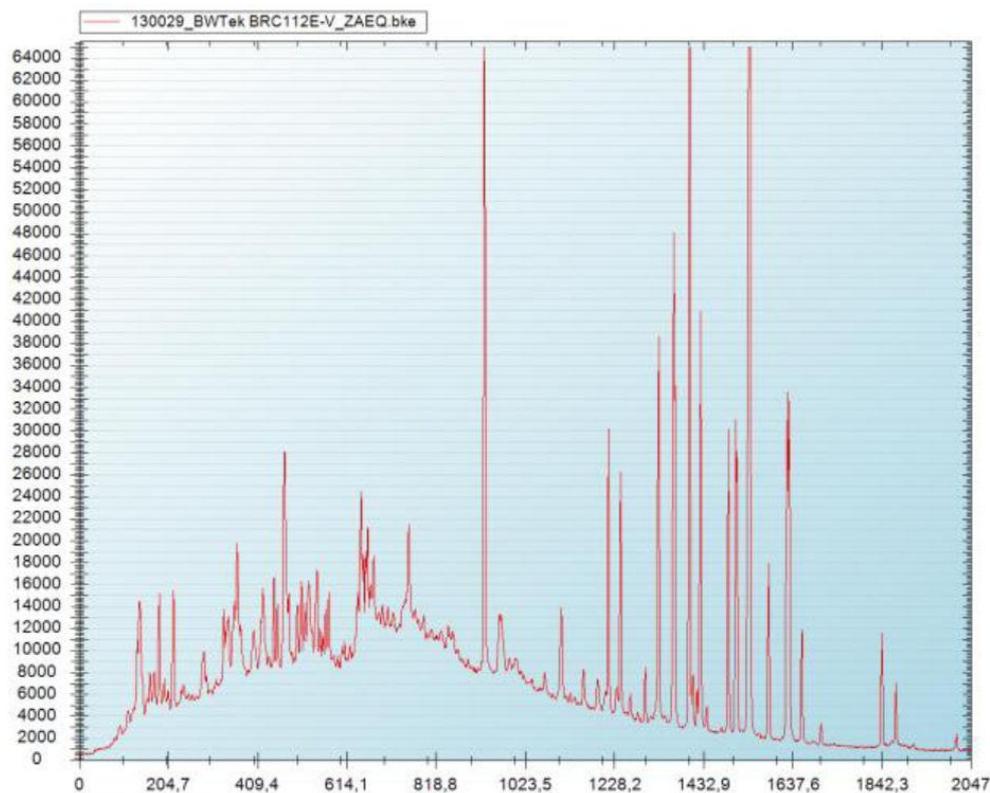


Figura 2.9 – Ejemplo de un espectro

Un espectrómetro se usa en espectroscopia para producir líneas espectrales y medir sus longitudes de onda e intensidades. Son instrumentos que funcionan en una amplia variedad de longitudes de onda, desde rayos gamma y rayos X hasta el infrarrojo lejano.

En general, cada espectrómetro funcionará sobre una pequeña porción de este rango total debido a las diferentes técnicas usadas para medir las distintas porciones del espectro. Por debajo de las frecuencias ópticas (es decir, en el rango de las microondas y radiofrecuencias), el analizador de espectro es un dispositivo electrónico estrechamente relacionado.

Concretamente, el espectrómetro es el dispositivo que se emplea habitualmente porque permite “resolver” el espectro y por lo tanto, emplear la información derivada de las líneas de emisión. En la figura anterior se muestra el aspecto de un espectro.

Los **espectroscopios** se usan a menudo en astronomía y en algunas ramas de la química. Los primeros aparatos de este tipo eran simplemente un prisma con graduaciones que marcaban las longitudes de onda de la luz. Los espectroscopios modernos, como los monocromadores, generalmente usan una rejilla de difracción, una hendidura móvil y una especie de fotodetector, además de estar automatizados y controlados por un ordenador. El espectroscopio fue inventado por Gustav Robert Georg Kirchhoff y por Robert Wilhelm Bunsen.

Cuando un material se calienta hasta la incandescencia emite una luz que es característica de la composición atómica del material. Las frecuencias de luz particulares dan lugar a bandas bruscamente definidas en la escala, que son similares a huellas digitales. Por lo que es muy utilizado actualmente para analizar la composición de materiales desconocidos.

### 2.2.3 TÉCNICAS ÓPTICAS: FOTODIODOS

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz. Cuando un haz de luz de suficiente energía incide en el diodo, excita un electrón dándole movimiento y crea un hueco con carga positiva. Si la absorción ocurre en la zona de agotamiento de la unión, o a una distancia de difusión de él, estos portadores son retirados de la unión por el campo de la zona de agotamiento, produciendo una fotocorriente.

Los diodos tienen un sentido normal de circulación de corriente, que se llama polarización directa. En ese sentido el diodo deja pasar la corriente eléctrica y prácticamente no lo permite en el inverso. En el fotodiodo la corriente (que varía con los cambios de la luz) es la que circula en sentido inverso al permitido por la unión del

diodo. Es decir, para su funcionamiento el fotodiodo es polarizado de manera inversa. Se producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz.

El fotodiodo se puede utilizar como dispositivo detector de luz, pues convierte la luz en electricidad y esta variación de electricidad es la que se utiliza para informar que hubo un cambio en el nivel de iluminación sobre el fotodiodo.

La principal diferencia entre el espectrómetro y el fotodiodo, reside en el tratamiento de la luz captada. El sistema de funcionamiento del espectrómetro consiste en la captación de la radiación luminosa y su análisis indicando la intensidad captada para las distintas longitudes de onda, mientras que el fotodiodo integra la luz captada en un determinado rango de longitudes de onda, convirtiéndola así en señal eléctrica [5].



Figura 2.10 – Ejemplo de un fotodiodo

Como ya se ha explicado, en la actualidad los sistemas utilizados típicamente para el control de los parámetros de soldadura en tiempo real por medio de la espectroscopía óptica de plasmas se basa en espectrómetros, pero también se puede realizar la monitorización sustituyendo el espectrómetro por el fotodiodo, aunque de forma más limitada debido a sus características [3].

En este proyecto en concreto, se ha utilizado el fotodiodo de forma que detecte la luz que se emite por parte del plasma generado cuando se realiza una soldadura. Cuando la soldadura es correcta, el fotodiodo recibe una determinada cantidad de luz, pero cuando se produce un defecto se generará una fluctuación, con lo que el fotodiodo producirá un cambio en la corriente que emite. Se puede decir en este sentido que el fotodiodo es “sensible” a los fallos que se producen en la soldadura.

## 3 – DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas utilizados típicamente para el control de los parámetros de la soldadura en tiempo real por medio de la espectroscopía óptica de plasmas se basan en el uso de espectrómetros.

En este proyecto el objetivo es lograr resultados similares sustituyendo el espectrómetro por fotodiodos, por lo que se plantea realizar una electrónica para el control y el tratamiento de la señal proporcionada por el fotodiodo.

El fotodiodo, al ser polarizado inversamente, genera una cierta circulación de corriente (señal) al ser excitado por la luz. Este proyecto está basado en el diseño de una electrónica capaz de controlar y tratar esa señal proporcionada por el fotodiodo de forma que ésta llegue a una placa hardware *opensource* de bajo coste (placa FEZ domino) que, habiendo sido programada mediante un entorno .NET de Microsoft previamente, es capaz de procesar esa señal y convertirla en valores que pueden ser mostrados por pantalla mediante un ordenador en tiempo real.

Para el diseño de esta electrónica se van a diseñar y montar tres circuitos y un fotodiodo sobre una misma placa, la cual tiene una alimentación unitaria y de bajo valor, en concreto 3.3V. La razón a este planteamiento es muy sencilla: el objetivo futuro del proyecto es diseñar un sistema portable de monitorización en tiempo real basado en el uso de fotodiodos, por lo que se debe tener en cuenta que estos tres circuitos deben estar alimentados unitariamente y con un voltaje muy pequeño. A su vez, en estos tres circuitos se debe usar el fotodiodo polarizado en el mismo sentido.

Una vez diseñada y montada la placa se va a proceder a la comprobación de la misma en el laboratorio. Como es sabido, la electrónica es muy traicionera y cuando se comprueba de forma práctica es muy común la aparición de fallos o valores no esperados, por lo que se deberá ajustar en el laboratorio el número de valores de componentes que sea necesario.

Para poder validar y comprobar las opciones de circuitos propuestas se van a realizar pruebas experimentales en el laboratorio. Éstas consistirán en detectar una serie de fallos en el proceso de soldadura propuestos como cambios de intensidades o cortes de gas. De esta forma se podrá comparar y estudiar el comportamiento real del sistema total propuesto.

## 3.2 DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA

### 3.2.1 ESTUDIO PREVIO DE CIRCUITOS

Para el diseño de la electrónica se ha partido de una serie de circuitos propuestos por la empresa HAMAMATSU [6] para el control y procesado de la señal proporcionada por un fotodiodo. A partir de esos circuitos se ha ido estudiando el comportamiento de cada uno de ellos, analizándose su funcionamiento y sus características. Posteriormente se han elegido para su implementación tres de ellos por razones que se explicarán más adelante. A continuación se expone el pequeño estudio realizado de los seis circuitos, haciendo más énfasis en los tres que se han implementado:

#### 1. LOW NOISE LIGHT-SENSITIVE PREAMPLIFIER

Este circuito es un preamplificador sensible a la luz de bajo nivel de ruido, el cual aplica una polarización inversa al fotodiodo para mejorar la respuesta en frecuencia. Este circuito genera una señal amplificada del *drain* del FET, pero las señales también se pueden extraer de lado de la fuente de interfaz para la siguiente etapa del circuito con baja resistencia de entrada.

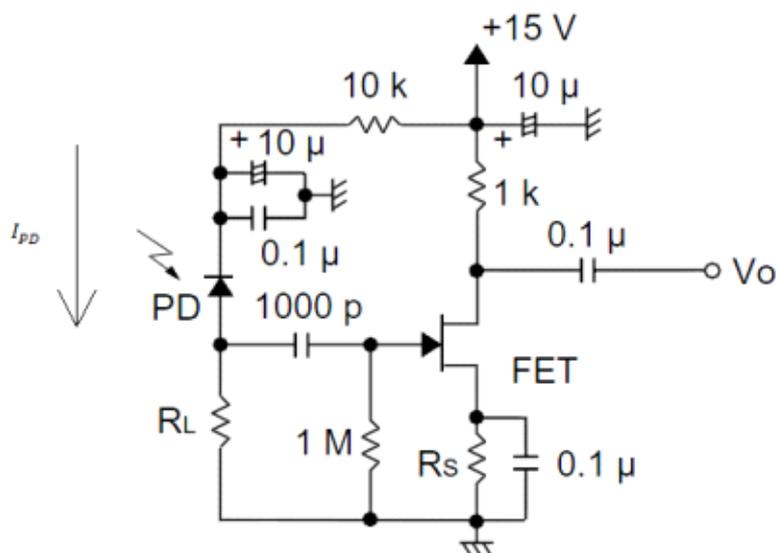


Figura 3.1 – Circuito 1

Con la  $R_L$  se determina la sensibilidad del fotodiodo, mientras que con la  $R_S$  se determina el punto de operación del FET. La tensión de salida viene determinada por la siguiente fórmula:

$$V_O = V_{DS} + R_S * I_D \tag{3.1}$$

2. LOW-LEVEL-LIGHT SENSOR HEAD

Este circuito es sensible para un nivel bajo de luz. HAMAMATSU presenta el circuito alojado en una caja de blindaje metálico para eliminar las interferencias electromagnéticas, pero finalmente se ha optado por no incluir el blindaje debido a que para este proyecto no es necesario.

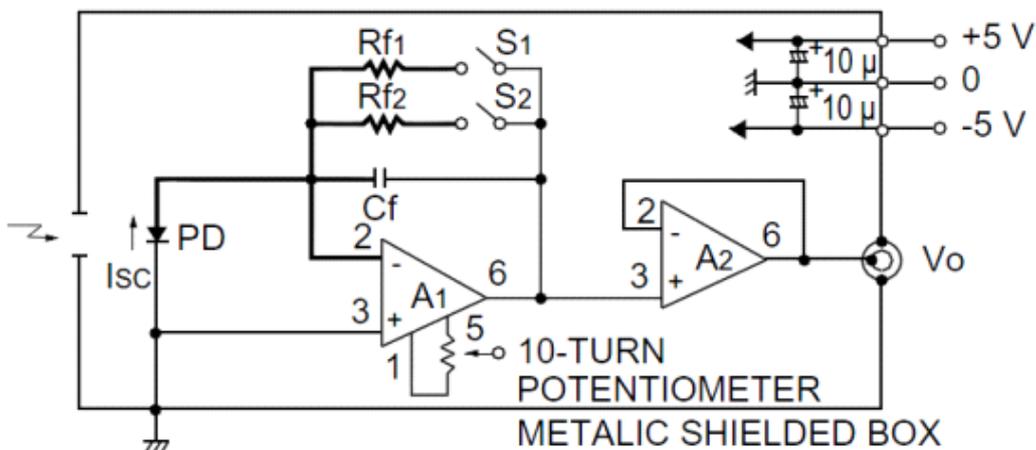


Figura 3.2 – Circuito 2

Este circuito está basado en dos etapas de amplificación,  $A_1$  y  $A_2$ . A continuación se presenta el estudio que se ha realizado a nivel de electrónica:

$A_1$ : En esta etapa el Amplificador 1 es un amplificador de transimpedancia, el cual tiene una impedancia de entrada muy baja. Esta configuración es muy útil para usar con sensores como en este caso.

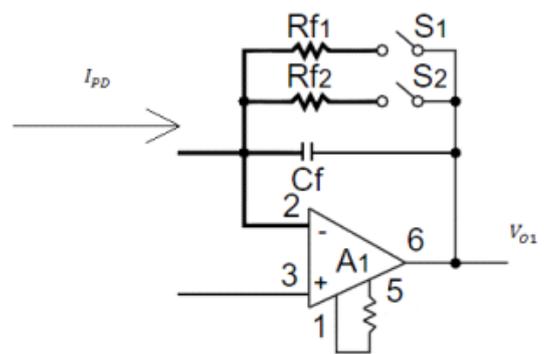


Figura 3.3 – Etapa de amplificación 1

$$\left. \begin{aligned} R_f &= R_{f1} // R_{f2} \\ V^- &= V^+ = 0 \\ I^- &= I^+ = 0 \end{aligned} \right\} V_{O1} = -I_{PD} * R_f \tag{3.2}$$

$A_2$ : En esta etapa el Amplificador 2 tiene configuración de seguidor siendo la impedancia de entrada muy elevada y la impedancia de salida casi

nula. Es muy útil para leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña, de esta forma se asegura que el circuito tendrá una sensibilidad alta. Esta característica es fundamental a la hora de poder detectar cambios en la señal eléctrica del fotodiodo debido a cambios en la luz que recibe causados a su vez por un posible defecto de la soldadura.

De esta forma, se usa la etapa  $A_2$  de buffer de forma que elimine los efectos de carga, por lo tanto con este amplificador se asegura tener una medida bastante exacta.

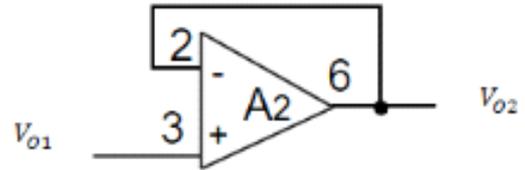


Figura 3.4 – Etapa de amplificación 2

$$\begin{aligned} V_{O2} &= V_{O1} \\ V_O &= -I_{PD} * R_f \end{aligned} \tag{3.3}$$

### 3. LIGHT SENSOR USING HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER (1)

Este circuito funciona como sensor de luz basándose en un amplificador operacional de alta velocidad. El tiempo de respuesta del circuito depende en gran medida de la constante de tiempo de la resistencia de realimentación  $R_f$  y su capacidad parásita en paralelo. Para minimizar el efecto de esta constante de tiempo, se han conectado dos resistencias en serie como resistencia de realimentación para dispersar esa capacidad parasita.

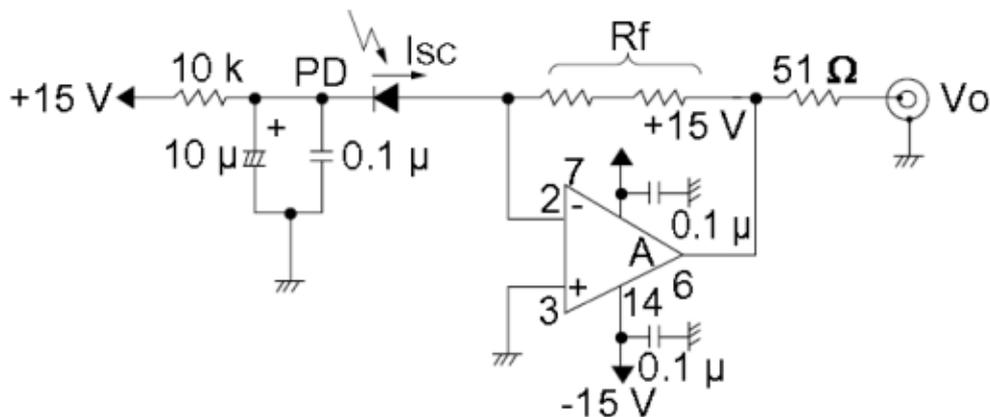


Figura 3.5 – Circuito 3

El amplificador del circuito es un amplificador de transimpedancia, el cual junto con la  $R_f$  convierte la intensidad que produce el fotodiodo en tensión, siendo esta tensión proporcional al valor que se le da a  $R_f$ . Este amplificador tiene una impedancia muy baja.

$$V_{OI} = -I_{SC} * R_f \quad (3.4)$$

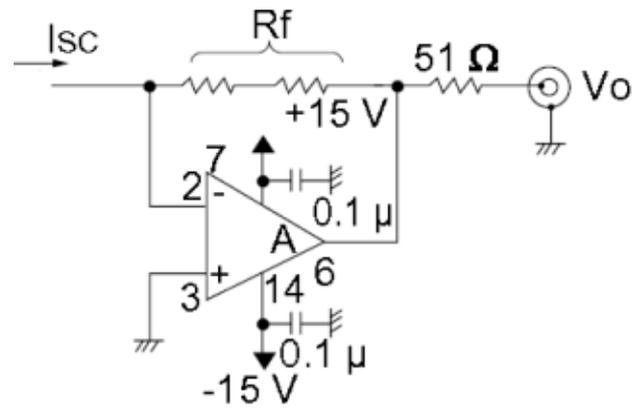


Figura 3.6 – Circuito 3 equivalente

#### 4. LIGHT SENSOR USING HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER (2)

Este circuito al igual que el anterior funciona como sensor de luz basándose en un amplificador operacional de alta velocidad. Sin embargo este circuito realiza una amplificación de la señal después de la conversión de voltaje a corriente realizada por la resistencia de carga  $R_L$ , por lo tanto no habrá efectos perjudiciales como resultado de un cambio de fase en el amplificador.

$$V^- = V^+ = R_L * I_{PD} \quad (3.5)$$

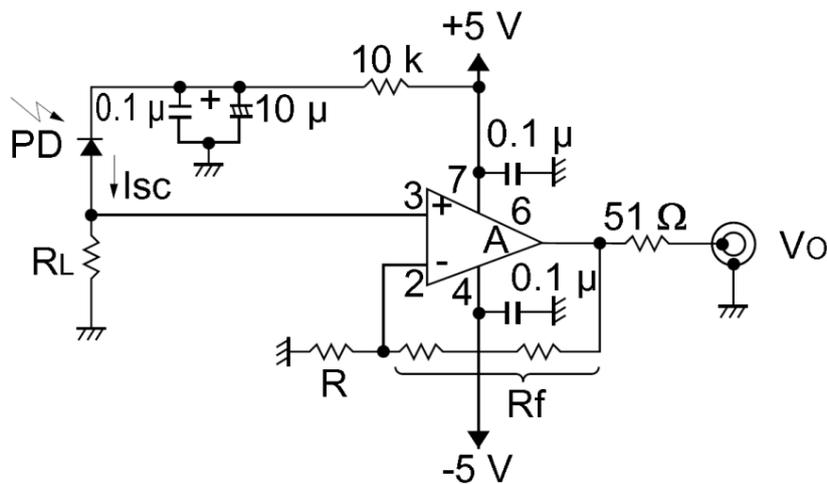


Figura 3.7 – Circuito 4

La amplificación viene dada por la  $R$  y  $R_f$  junto con el amplificador, por lo tanto la tensión de salida dependerá de los valores que se les asigne a las resistencias  $R_L$ ,  $R_f$  y  $R$ .

$$\left. \begin{aligned} V^- - V_o &= \frac{-R_f * V^-}{R} \\ V_o &= V^- * \left( \frac{R_f}{R} + 1 \right) \end{aligned} \right\}$$

$$V_o = R_L * I_{PD} * \left( \frac{R_f}{R} + 1 \right) \quad (3.6)$$

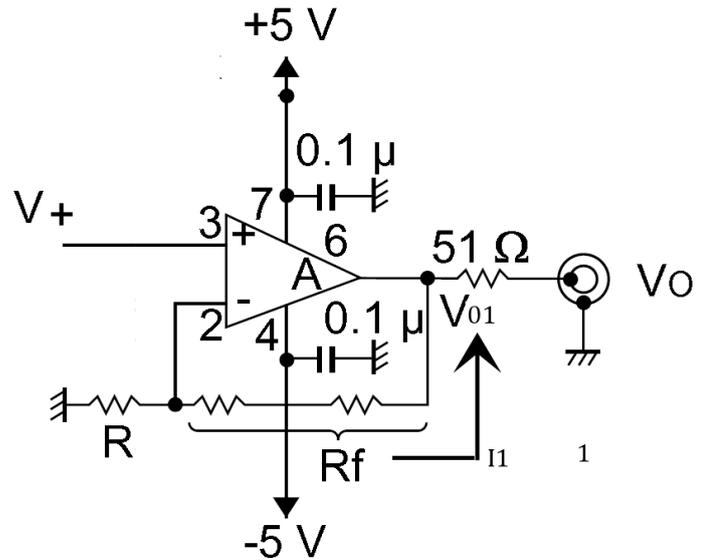


Figura 3.8 – Circuito 4 equivalente

### 5. LIGHT-TO-LOGARITHMIC-VOLTAGE CONVERSION CIRCUIT

Este circuito es un conversor logarítmico de luz a voltaje, es decir, la tensión de salida de este circuito es proporcional a la variación logarítmica de luz detectada por el fotodiodo. La corriente  $I_b$  es la corriente que ajusta el punto de operación del circuito, y por lo tanto es mucho menor que la corriente que produce el fotodiodo. Si eliminásemos la corriente  $I_b$ , el circuito se volvería inestable cuando la intensidad del fotodiodo llegase a ser cero debido a que no incidiese luz sobre el mismo.

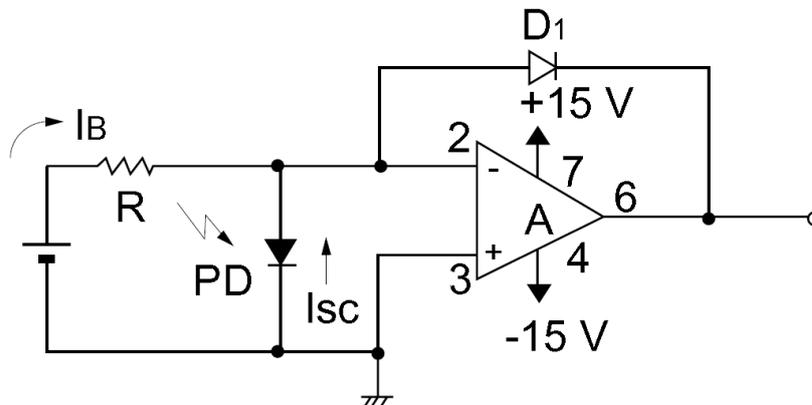


Figura 3.9 – Circuito 5

$$V_o = -0,06 \log \left( \frac{I_{SC} + I_B}{I_o} + 1 \right) \quad (3.7)$$

6. LIGHT INTEGRATION CIRCUIT

Este circuito es un integrador de luz que se utiliza para medir la potencia media integrada de un tren de impulsos de luz. El amplificador A acumula la fotocorriente generada por cada pulso de luz integrada en el condensador C. La corriente  $I_{sc}$  generada por el fotodiodo depende de la cantidad de luz que le llega al fotodiodo. Así mismo, la tensión de salida  $V_O$  medida inmediatamente después del *reset* depende del tiempo de integración  $T$  y la capacidad  $C$ , siendo por tanto esta tensión el resultado de la fotocorriente acumulada durante  $T$ .

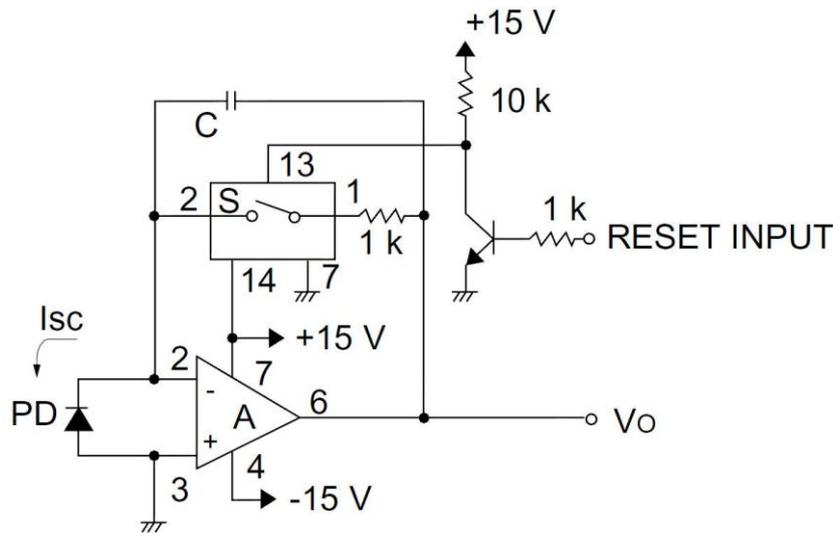


Figura 3.10 – Circuito 6

Experimentalmente, si se desea medir la tensión de salida del circuito, con el *switch* S abierto y el fotodiodo recibiendo luz, el condensador integra la corriente. Justo antes de que se active el *reset* se mide  $V_O$ . De esta forma se puede aplicar una fórmula que defina la  $V_O$  en función del valor del condensador y de la corriente del fotodiodo  $I_{PD}$  en función del tiempo  $t$  que ha estado acumulando corriente generada gracias a la luz incidente.

$$V_O = I_{sc} * t * \frac{1}{C} \tag{3.8}$$

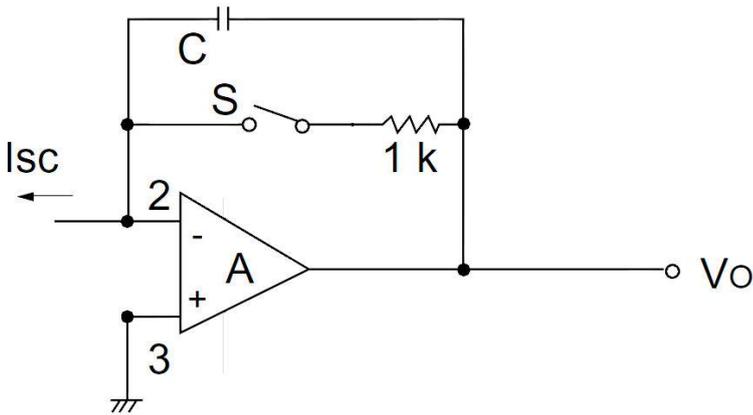


Figura 3.11 – Integrador ideal

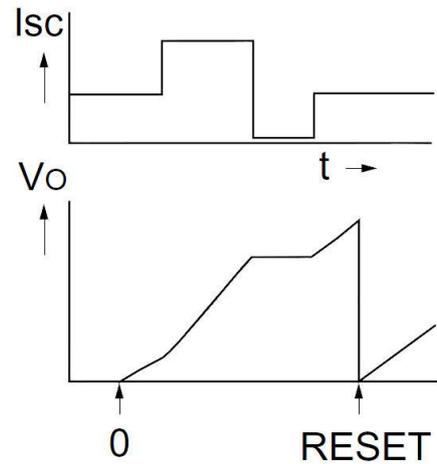


Figura 3.12 – Reset

Este circuito se ha montado en la placa V1.0 y, aunque teóricamente debería funcionar, cuando se ha pasado a la caracterización de los circuitos en el laboratorio se ha demostrado que no funciona (este hecho se explica en el apartado “Caracterización de los circuitos en el laboratorio”). Debido a que no funcionaba correctamente se ha decidido estudiar otro circuito equivalente al número seis, que pudiese solucionar el problema que suponía su implementación. Para ello se ha elegido el circuito “Deboo” Single-Supply Integrator [7], el cual ha sido diseñado por la empresa estadounidense Maxim Integrated, que se dedica a comercializar productos semiconductores y circuitos integrados.

“DEBOO” SINGLE-SUPPLY INTEGRATOR

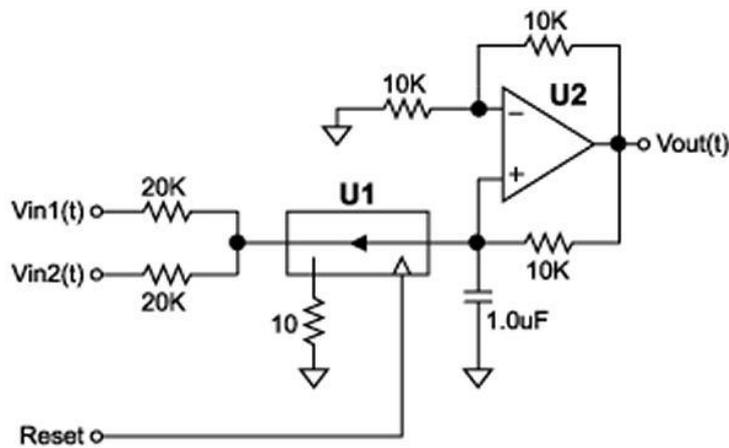


Figura 3.13 – “DEBOO” single-supply integrator

Este circuito es un integrador de luz que usa un solo suministro de tensión, por lo tanto es ideal para su implementación en la placa. Su funcionamiento es similar al circuito anterior, a través de  $V_{in1}$  o  $V_{in2}$  llega la

señal procedente del fotodiodo para ser integrada por el condensador. Se puede medir la tensión de salida  $V_O$  justo en el momento previo a la activación del *reset* digital que se controla a través de la placa FEZ Domino.

Junto con los circuitos que se han implementado, como se muestra en el siguiente apartado, la otra parte fundamental para el desarrollo de este proyecto ha sido el fotodiodo utilizado. En este caso el elegido ha sido el fotodiodo de silicio NT53-378 con respuesta mejorada para el azul de *Edmund Optics* [8]. Como características importantes, mencionar que posee un área activa de  $5.1 \text{ mm}^2$  y una corriente de saturación  $I_{SAT} = 2 \text{ mA}$ , dato que se ha tenido en cuenta en los cálculos para el diseño de los circuitos.

## 3.2.2 DISEÑO CON DESIGNSPARK PCB

### 3.2.2.1 INTRODUCCIÓN

Una vez elegidos los tres circuitos que mejores características tenían para el desarrollo del proyecto se ha procedido a su implementación. Primero se ha elegido un valor teórico para cada uno de los componentes como resistencias y condensadores. A continuación se ha buscado los componentes teóricamente mejores para el comportamiento de los circuitos como son los amplificadores, *switchs* y el *reset* para el circuito seis, basándose en las hojas de características de los mismos.

Con los componentes teóricamente adecuados para los circuitos, el siguiente paso ha sido realizar el diseño de la placa mediante un programa llamado *DesignSpark PCB* [9]. Este programa es una herramienta muy útil para el diseño de PCB (*printed circuit board*), es decir, de placas de circuitos impresos. Con esta herramienta se puede diseñar la placa primero a nivel esquemático, definiendo los componentes que se van a utilizar y las conexiones de los mismos. A continuación se pasa al diseño del *layout* a nivel PCB, es decir, el diseño real de la placa con los componentes que se van a utilizar con sus dimensiones reales. Para ello se ha usado las múltiples librerías que posee este software o bien se ha creado el componente que se requiere a partir de las especificaciones de las hojas de características del mismo.

A continuación se explica el proceso de diseño para las dos placas que se han implementado. La razón de haber diseñado dos es la siguiente: la primera placa ha sido diseñada a partir de cálculos teóricos y una vez fabricada se ha caracterizado en el laboratorio y se ha podido comprobar, como se explica en el apartado de caracterización de los circuitos, que algunos valores no eran los correctos y que algunas conexiones no eran del todo óptimas. Por ello se realizaron los cambios pertinentes en el laboratorio hasta que se consiguió la implementación más óptima de

la placa. Posteriormente se volvió a realizar el diseño de la placa (versión V2.0), pero esta vez a partir de los datos obtenidos en la caracterización de la primera placa.

### 3.2.2.2 FEZ PHOTODIODES V1.0

Como ya se ha explicado anteriormente, en primer lugar se ha realizado el diseño de la placa FEZ PHOTODIODES V1.0 a partir del estudio teórico previo. Para ello se va a explicar cómo se ha diseñado paso a paso cada circuito. Se han elegido tres: uno para un nivel bajo de luz incidente sobre el fotodiodo, otro basado en un amplificador de alta velocidad y el último, un integrador de luz con *reset*.

Circuito 1: Para el primer circuito se ha elegido el LOW-LEVEL-LIGHT SENSOR HEAD, un circuito para un nivel bajo de luz incidente que gracias al amplificador de transimpedancia  $A_1$  es muy útil para usarse con sensores. También está compuesto por el amplificador seguidor  $A_2$  que es muy útil para leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña.

Además se ha decidido introducir un filtro RC a la salida del circuito para eliminar el posible ruido que pueda aparecer. De la misma manera, en la conexión de alimentación de los amplificadores, es decir, la conexión de los amplificadores con el pin de 3.3V de la placa FEZ domino, se ha puesto un condensador en paralelo para eliminar las capacidades parásitas asociadas.

A continuación se detalla los componentes que se han utilizado para su implementación, así como el nombre que se ha utilizado en el esquemático dentro del programa DesignSpark PCB:

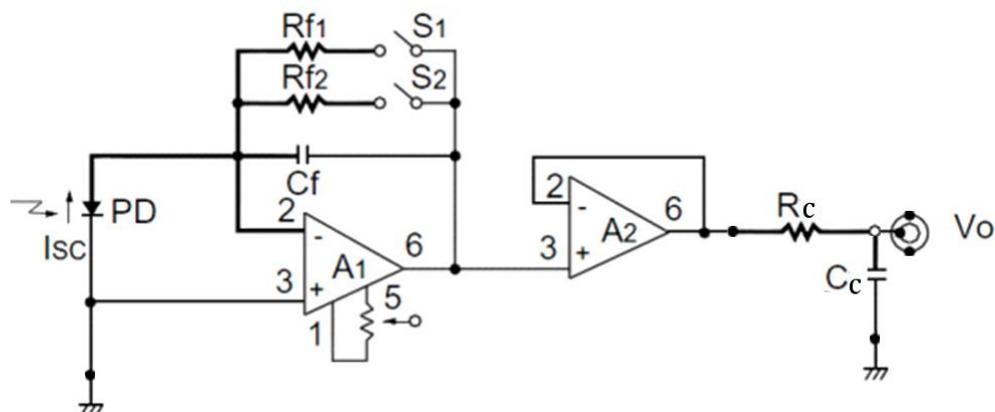


Figura 3.14 – Circuito 1 V1.0

Para los dos amplificadores se ha escogido el modelo AD8032 que integra dos amplificadores en el mismo chip.

$$A_1=U1a \quad A_2=U1b$$

Como se ha supuesto que mientras incide luz sobre el fotodiodo, éste produce una corriente de  $I_{PD}=1\text{mA}$ , se han elegido los siguientes componentes a partir de los cálculos expuestos en el apartado de estudio previo de circuitos:

$$R_{f1}=R_2=3.3\text{ k}\Omega \quad R_{f2}=R_1=12\text{ k}\Omega \quad C_f=C_1=10\text{ pF}$$

El filtro se ha diseñado para tener una frecuencia de corte de aproximadamente  $f_c=2\text{ kHz}$ , concretamente:

$$R_C=R_{12}=820\ \Omega \quad f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \approx 2\text{ KHz} \quad (3.9)$$

$$C_C=C_7=0.1\ \mu\text{F} \quad f_c = \frac{1}{2 * \pi * 820 * 0,1 * 10^{-6}} = 1.94\text{ KHz}$$

Por otro lado el condensador conectado a la alimentación de los amplificadores es:

$$C_6=0.1\ \mu\text{F}$$

Circuito 2: El segundo circuito que ha sido implementado es *LIGHT SENSOR USING HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER (2)*, el cual funciona como sensor de luz basándose en un amplificador operacional de alta velocidad como se ha explicado en el apartado de estudio previo de circuitos.

Para este circuito, al igual que en el primero, se ha diseñado un filtro a la salida para eliminar el ruido que pueda aparecer. También se ha introducido un condensador en paralelo en la entrada de alimentación del amplificador de la misma forma que en el circuito 1.

Detalles de los componentes:

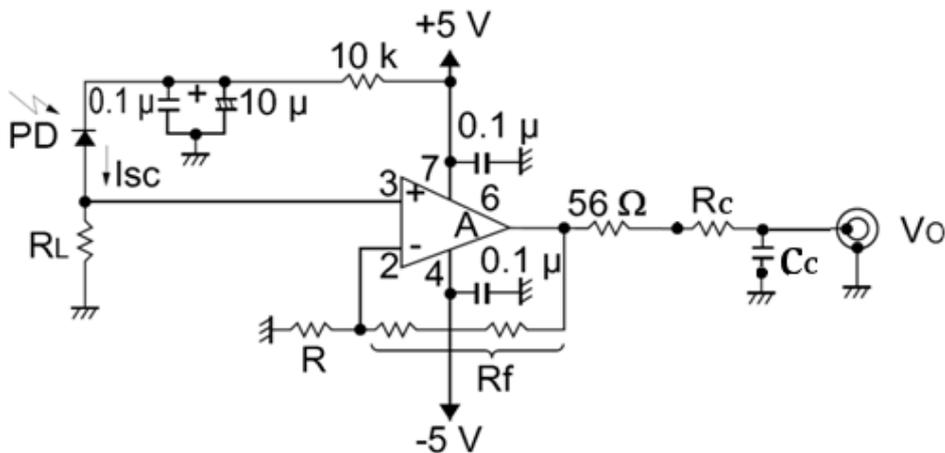


Figura 3.15 – Circuito 2 V1.0

El amplificador que se ha utilizado es el AD8032 (anexo), y como tiene dos amplificadores en el mismo encapsulado se ha usado uno para este circuito y el otro amplificador para el circuito 3, de esta forma se ahorran costes y se puede trabajar de

forma más eficiente.

$$A=U2a$$

A partir de los cálculos expuestos en el apartado de cálculos teóricos previos, y suponiendo que la corriente producida por el fotodiodo es de  $I_{PD}=1\text{mA}$  cuando incide luz, se han escogido los siguientes componentes de forma que se tenga una tensión de salida aproximada de  $V_0=3.3\text{ V}$ .

$$C3=0.1\ \mu\text{F} \quad C4=10\ \mu\text{F} \quad R7=10\ \text{k}\Omega \quad R_L=R3=330\ \Omega \quad R=R4=1.2\ \text{k}\Omega$$

$$R_f=(R5+R8)=11.2\ \text{k}\Omega; R5=5.6\ \text{k}\Omega R8=5.6\ \text{k}\Omega$$

Al igual que en el anterior circuito se ha diseñado un filtro RC para tener una frecuencia de corte de aproximadamente  $f_c=2\ \text{kHz}$ , concretamente:

$$R_c=R9=56\ \Omega$$

$$C_c=C8=1.56\ \mu\text{F}$$

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \approx 2\ \text{KHz} \tag{3.10}$$

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * 56 * 1,56 * 10^{-6}} = 1.821\ \text{KHz}$$

Por último el condensador conectado a la alimentación del amplificador que sirve para este circuito y para el circuito siguiente es:

$$C5= 0.1\ \mu\text{F}$$

**Circuito 3:** Para el circuito 3 se ha elegido implementar el *LIGHT INTEGRATION CIRCUIT*, que es el circuito más complejo y teóricamente más idóneo para el objetivo que se ha propuesto. Una de las características que le hace ser más idóneo es el poder controlar el tiempo de integración de la luz a través del *reset* digital.

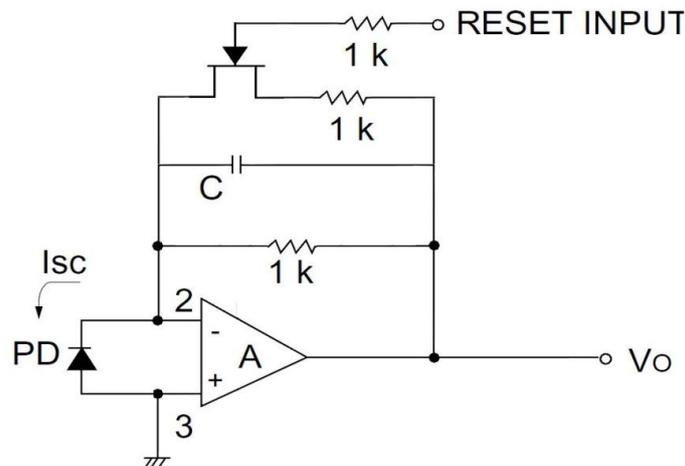


Figura 3.16 – Circuito 3 V1.0

Como se explica anteriormente, este circuito usa un amplificador AD8032 que se encuentra alojado en el mismo chip que utiliza el circuito 2.

$$A=U2b$$

Para averiguar el valor del condensador se ha usado la fórmula estudiada en el apartado 3.2.1. Para ello se ha supuesto que la tensión de salida  $V_O=3.3$  V, y se ha supuesto, a partir de las hojas de características del fotodiodo, que como la corriente máxima es de 1mA, se ha usado en la fórmula el doble ( $I_{PD}=2$  mA) para que el condensador solo se cargue a la mitad, puesto que al final de la carga pierde la linealidad. Así mismo, se ha decidido establecer un tiempo de captura de  $t=1$  ms que es aproximadamente 1000 capturas por segundo. El resultado ha sido la elección de estos componentes:

$$R6=1 \text{ k}\Omega$$

$$R10=1 \text{ k}\Omega$$

$$R11=1 \text{ k}\Omega$$

$$C=C2=680 \text{ nF}$$

Para el diseño del reset se ha variado un poco la versión que se estudió de *HAMAMATSU*; de esta forma se ha usado un amplificador MOS en serie con una resistencia de valor 1 k $\Omega$  y todo ello en paralelo con el condensador y con una resistencia de 1 k $\Omega$ . El *reset* está conectado al circuito a través de una resistencia de 1 k $\Omega$  conectada a la puerta del amplificador MOS. Concretamente se ha utilizado el amplificador NMOS SOT-23 que es el chip *U11* en el diseño de *DesignSpark PCB*.

Una vez que se han elegido todos los componentes de los circuitos, se procederá al diseño de la placa con el *software DesignSpark PCB*. Como ya se ha explicado en la introducción, primero se hizo un diseño a nivel de esquemático donde se incluían los tres circuitos con sus correspondientes componentes, la conexión de los circuitos con el fotodiodo y las entradas y salidas de la placa que en este caso son las mismas que el hardware sobre la que va a ir "montada" la placa FEZ domino. A continuación se detalla el esquema realizado:

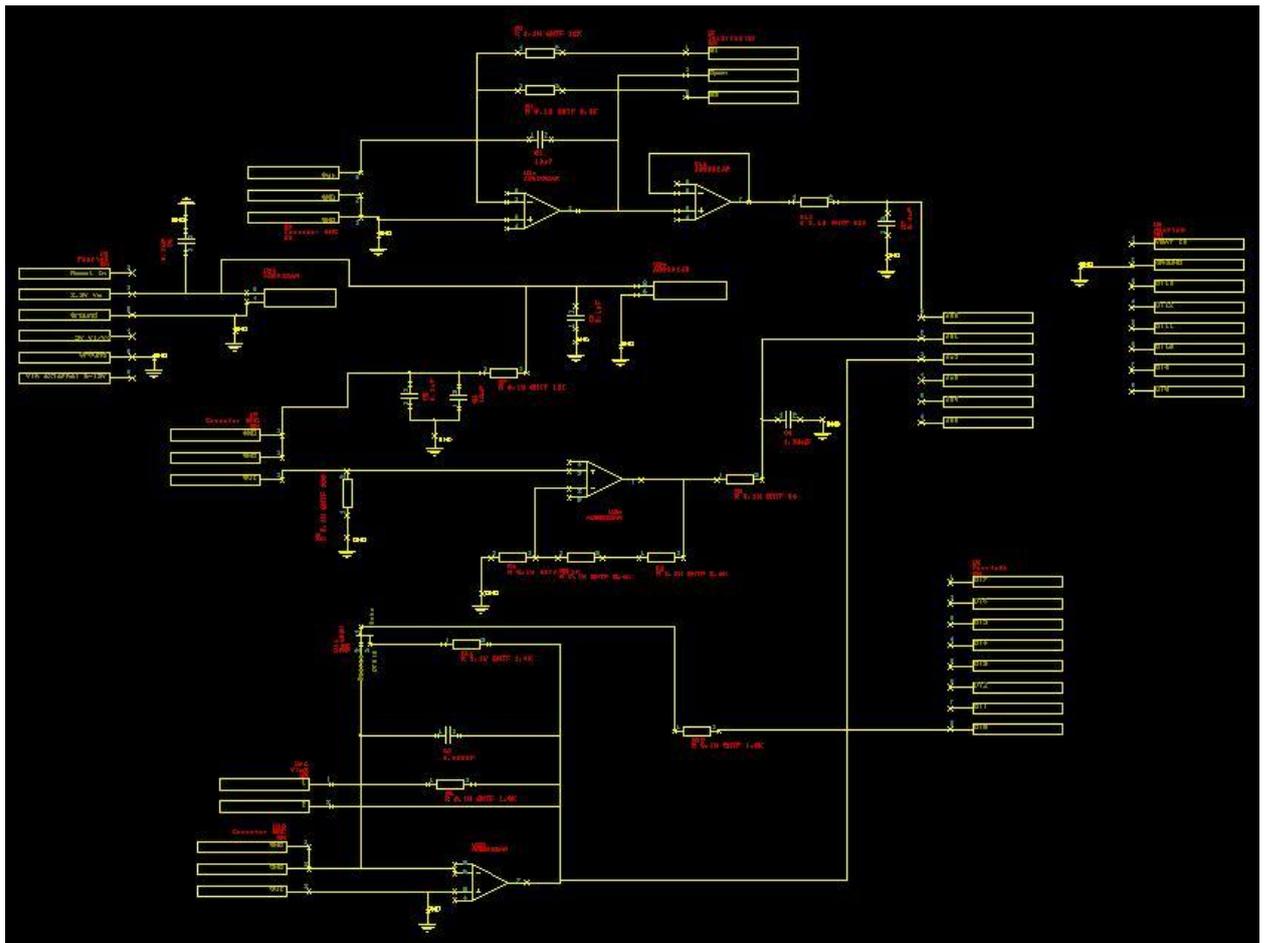


Figura 3.17 – Esquemático V1.0

El siguiente paso ha sido diseñar el *layout*, es decir el diseño de la placa PCB, a partir del esquemático. Para ello se ha tenido en cuenta las dimensiones de la placa FEZ domino, puesto que tienen que tener exactamente las mismas medidas.

El primer paso ha sido definir las dimensiones de la placa 68.58 x 53.34 mm. A continuación se han diseñado las cuatro series de puertos de entrada o salida de la placa que coinciden exactamente sobre los de la placa FEZ domino, puesto que la nueva placa tiene que ir “pinchada” sobre la FEZ. Seguidamente se han diseñado tres conectores BNC exactamente iguales para conectar los circuitos al fotodiodo. Para su diseño se ha tenido en cuenta las dimensiones del fotodiodo que se ha elegido.

A continuación se han incorporado los componentes de los circuitos a partir del esquemático realizado previamente, para poder finalmente realizar todas las conexiones de la placa. Para ello se ha tenido en cuenta que las pistas no se pueden cruzar unas con otras y que se debe de dejar un espacio mínimo entre componentes y

pistas de conexión, así mismo se ha establecido un tamaño de ancho estándar para las pistas de 0.50 mm.

El último paso ha sido realizar los planos de masa de la placa teniendo en cuenta que se ha necesitado usar las dos caras de la placa y por lo tanto se han tenido que diseñar dos planos de masa. La razón de haber usado las dos caras de la placa es que se ha necesitado pasar alguna pista por la otra cara debido a la complejidad de los circuitos, resultando conectar estos en la misma cara misión imposible.

El resultado de todo este diseño es el siguiente:

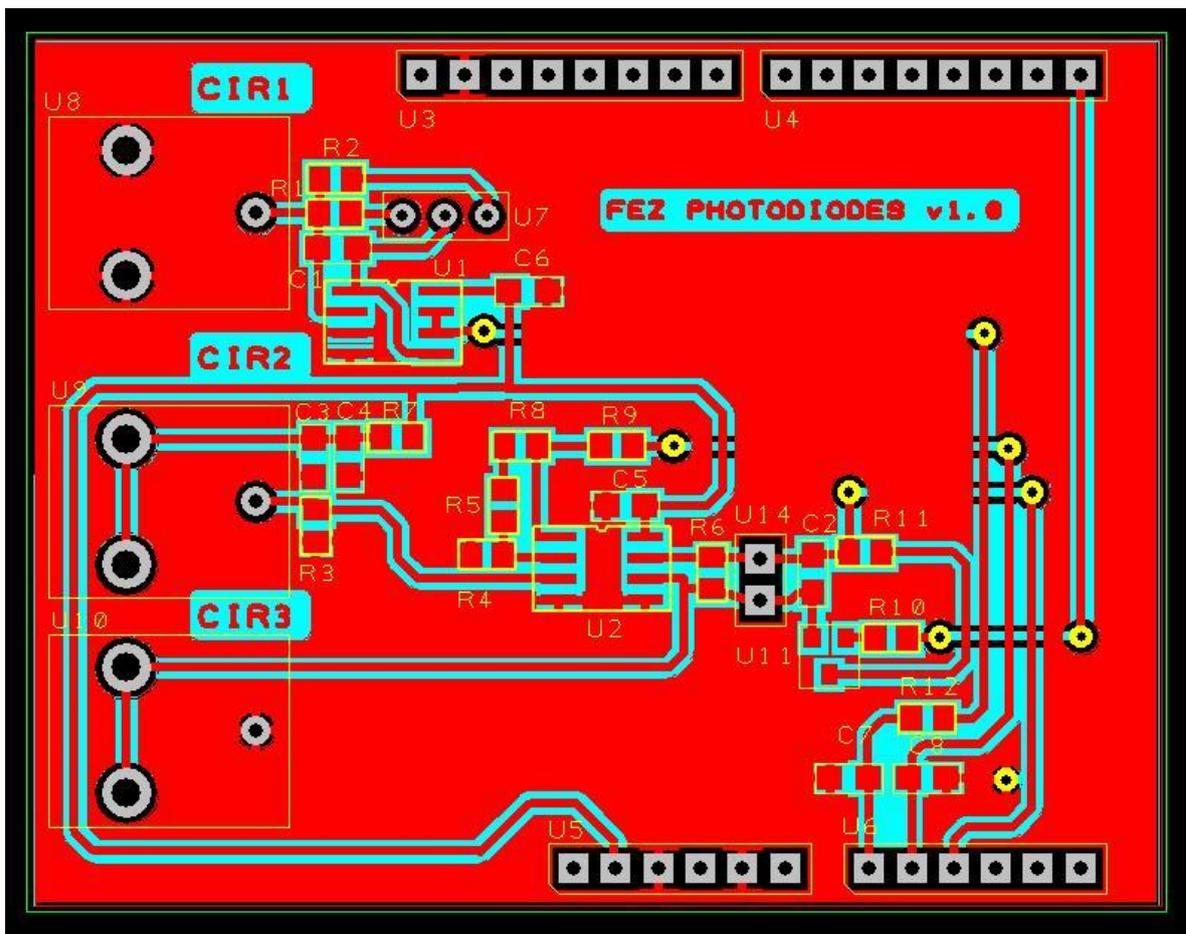


Figura 3.18 – Layout V1.0

En la figura se puede apreciar que se ha diseñado la placa con un cierto orden, definiendo el circuito de arriba el circuito 1, el del medio el circuito 2 y por último el circuito de abajo el circuito 3. También se puede ver que los *pads* amarillos son las conexiones de la cara frontal con la cara posterior. Por otro lado, el plano de masa rojo corresponde a la cara superior mientras que el plano de masa azul corresponde a la cara posterior.

Una vez finalizado el diseño se ha fabricado la placa a través de un proceso siguiendo los siguientes pasos. Primero se ha introducido una placa virgen con el diseño de *DesignSpark PCB* en una insoladora de luz ultravioleta por ambas caras de la placa, a continuación se ha sumergido la placa en liquido revelador, dejando ver en esta la forma del circuito. Por último se ha introducido la placa en una mezcla del 50% de agua oxigenada y ácido clorhídrico dando lugar a la placa que se puede ver en la siguiente figura.

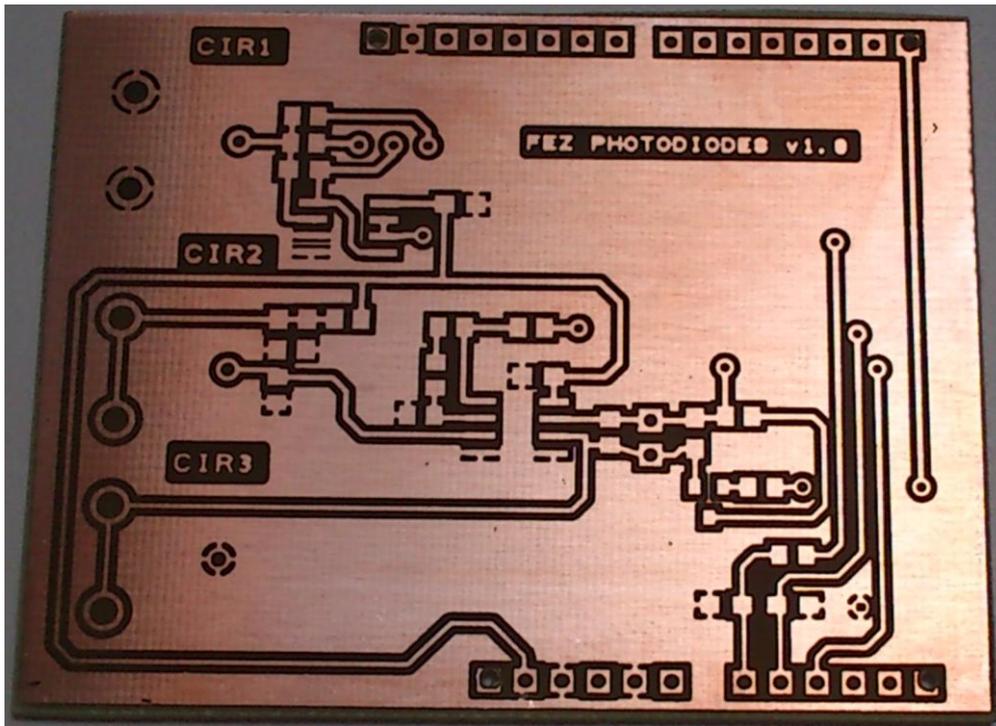


Figura 3.19 – Placa V1.0 frontal recién fabricada

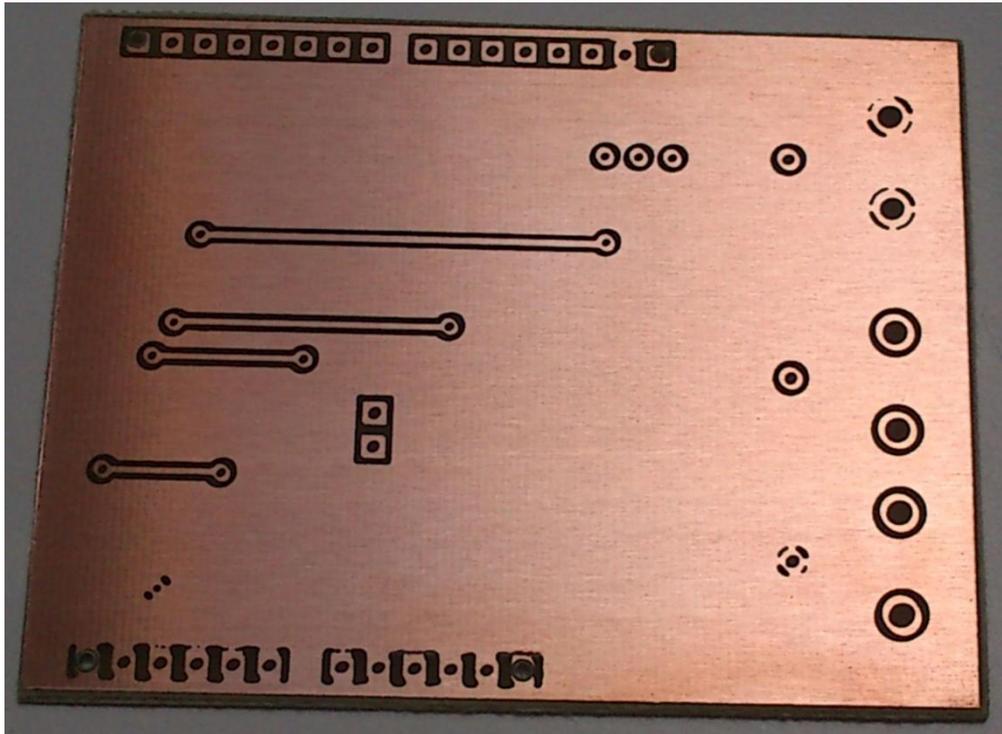


Figura 3.20 – Placa V1.0 dorsal recién fabricada

Una vez fabricadas las placas, se ha pasado a soldar todos los componentes que se necesitan siguiendo un determinado orden. Primero se han realizado todos los agujeros de la placa y a continuación se han soldado las cuatro series de pines de entrada/salida. Después se han soldado el resto de componentes como resistencias, condensadores, *switch* y amplificadores. El último paso realizado ha sido soldar los conectores BNC. Como se puede apreciar en la figura 3.22 ha sido necesario añadir una tira de cinta aislante para evitar un cortocircuito entre los conectores BNC y la pista que pasa por debajo de los mismos. A continuación se va a mostrar una comparativa entre el modelo 3D diseñado con *DesignSpark PCB* y la placa real totalmente finalizada.

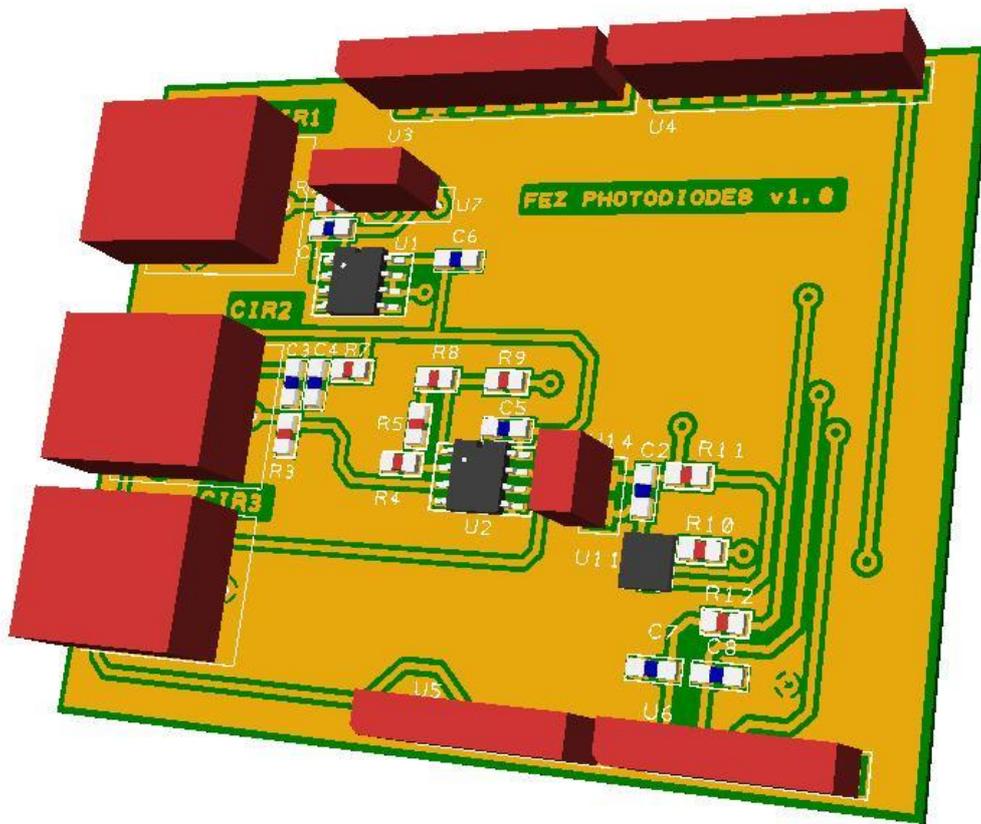


Figure 3.21 – FEZ Photodiodes V1.0 3D

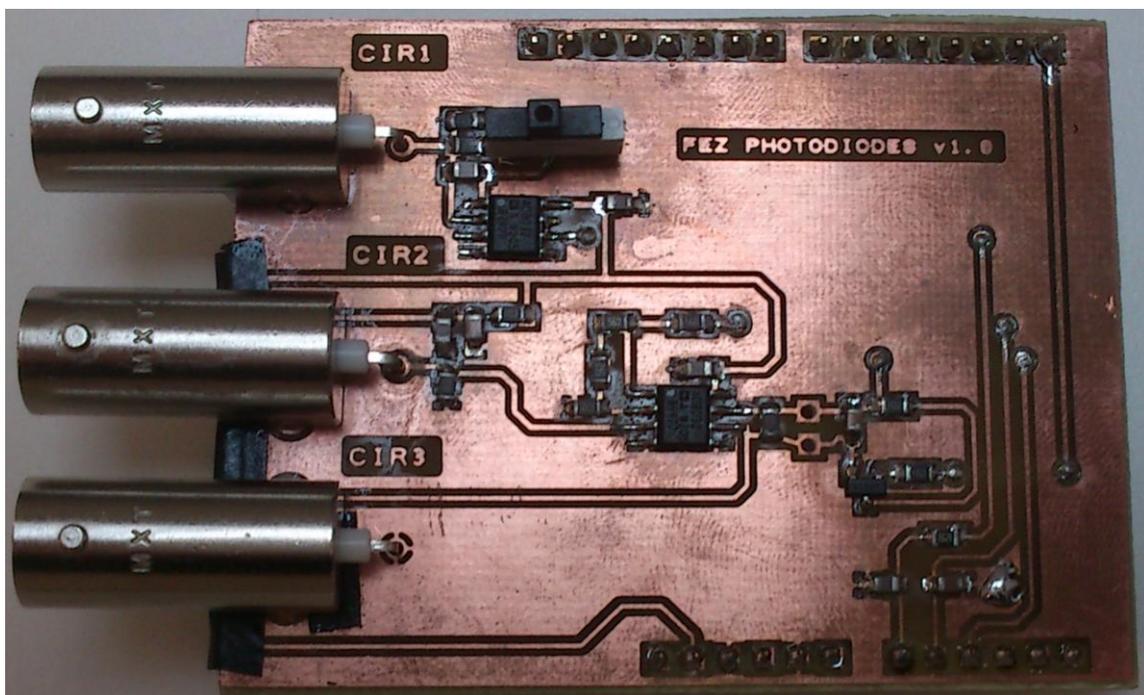


Figure 3.22 – FEZ Photodiodes V1.0



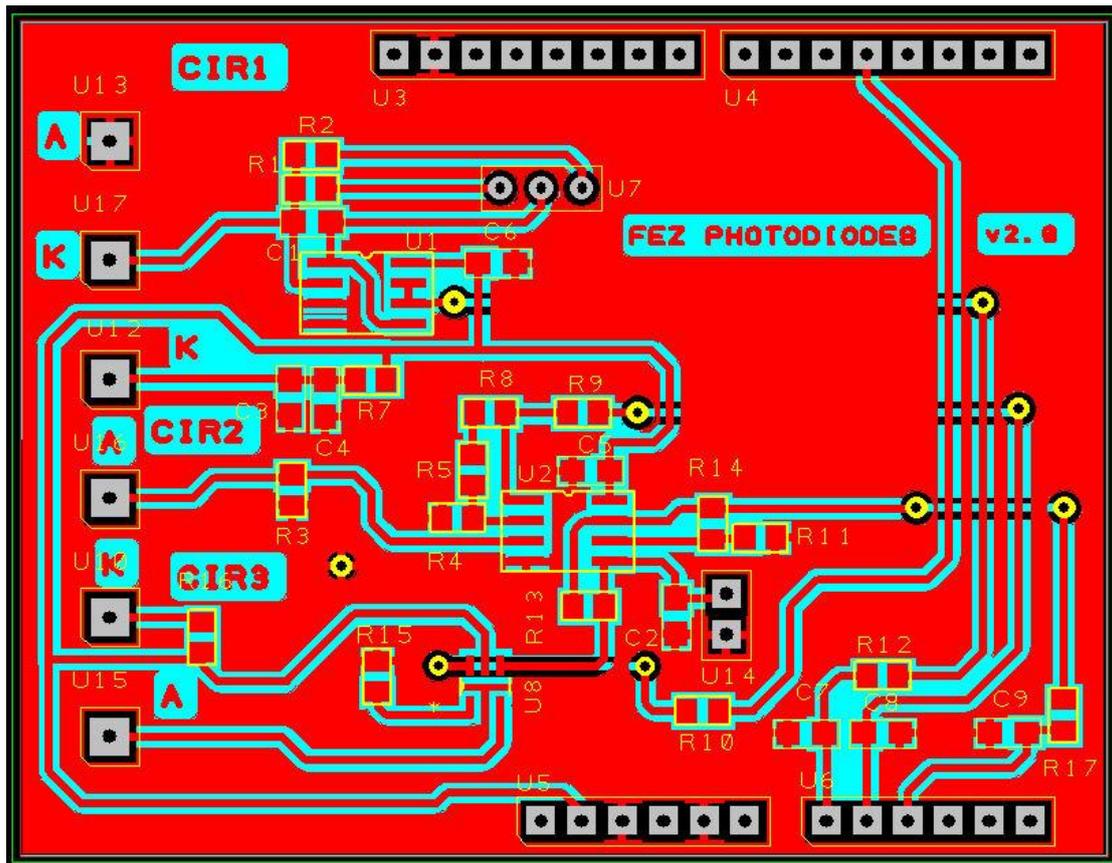


Figura 3.24 – Layout FEZ photodiodes V2.0

Después de finalizar el diseño se ha procedido a fabricar la placa usando el mismo sistema que se usó en la placa anterior con el siguiente resultado:

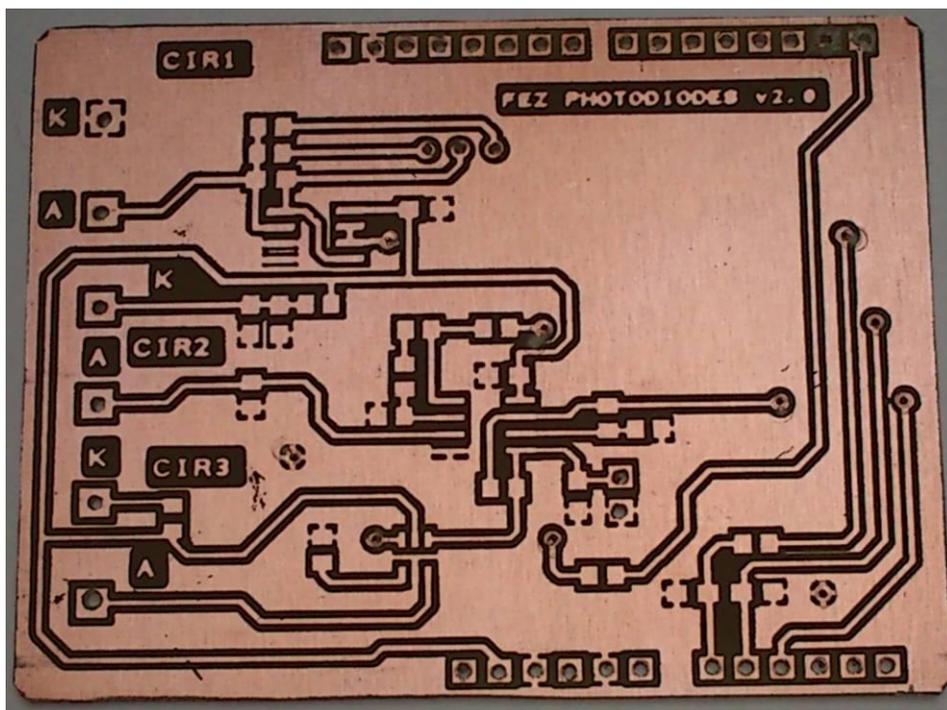


Figure 3.25 – Placa V2.0 frontal recién fabricada

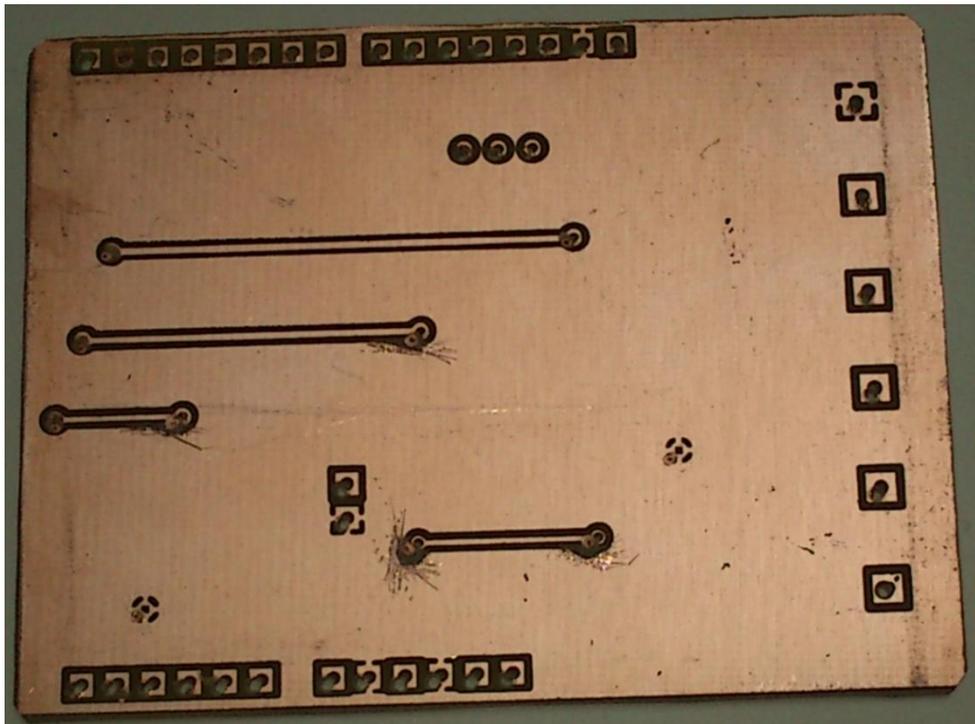


Figura 3.26 – Placa V2.0 dorsal recién fabricada

Por último se han soldado todos los componentes siguiendo exactamente el mismo orden seguido en la placa predecesora. En la siguiente página se puede observar la comparación entre el modelo 3D de DesignSpark PCB y el resultado real de todo el proceso de diseño y fabricación.

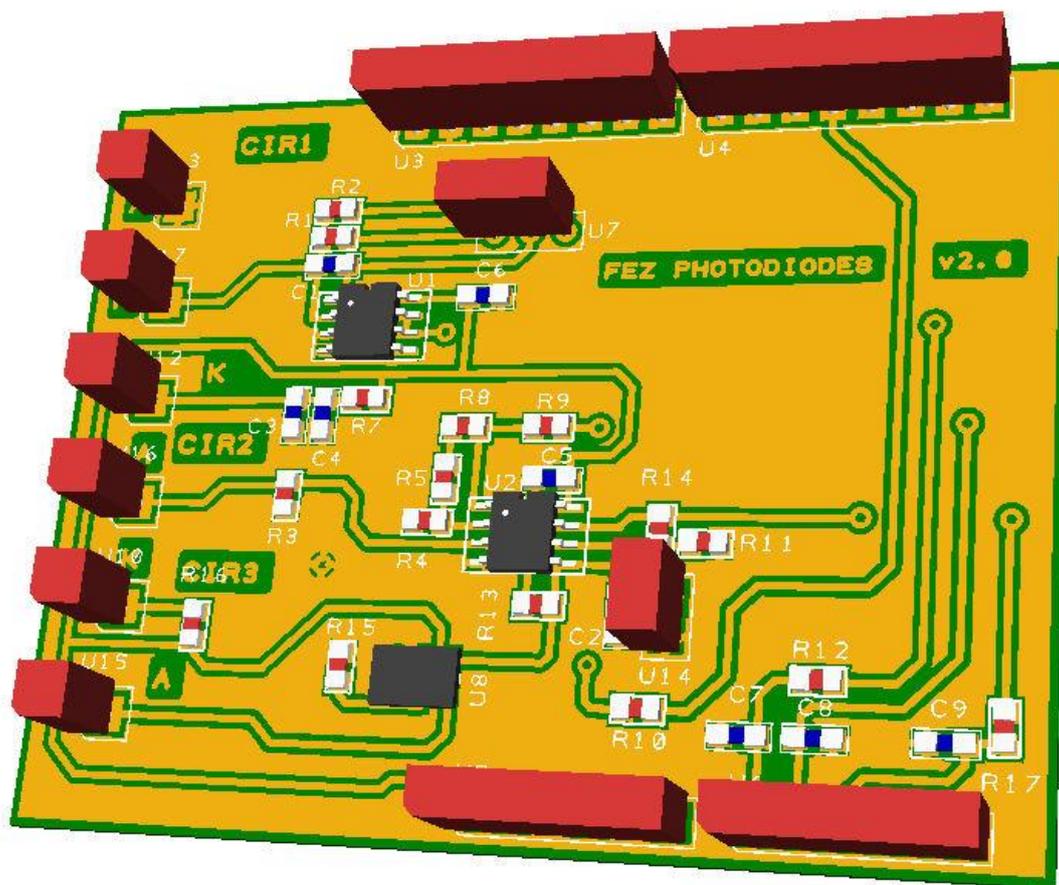


Figura 3.27 – Diseño 3D FEZ photodiodes V2.0

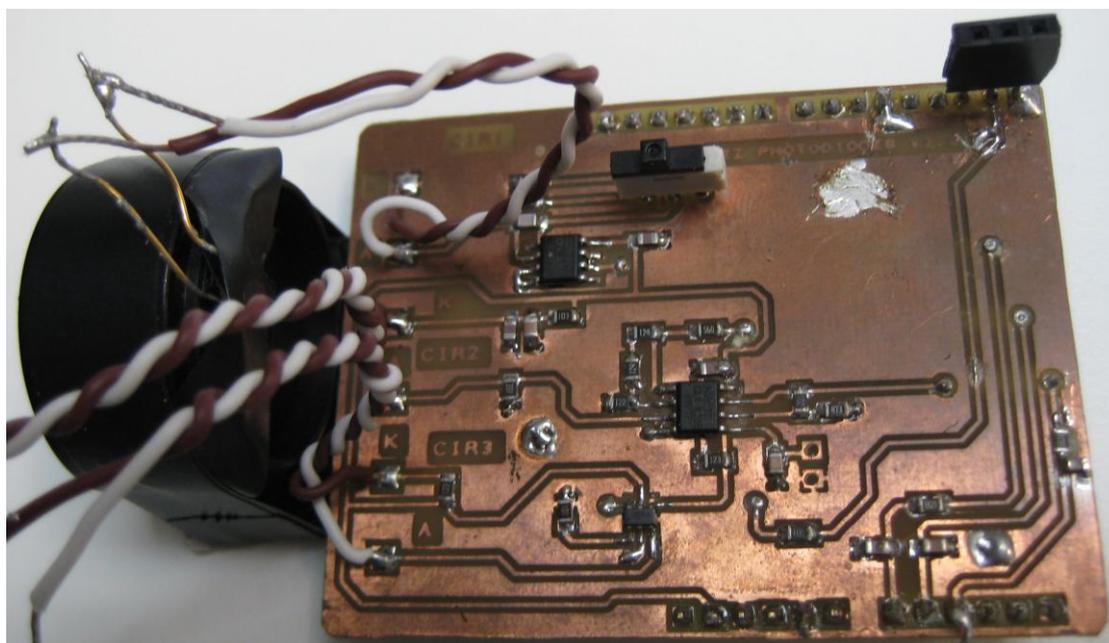


Figura 3.28 – FEZ photodiodes V2.0

### 3.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS CIRCUITOS EN EL LABORATORIO

#### 3.2.3.1 FEZ PHOTODIODES V1.0

Continuando con el objetivo de diseñar un sistema portable de bajo coste para la monitorización en tiempo real de procesos de soldadura, se ha pasado al laboratorio del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria para caracterizar los tres circuitos de la placa diseñada. Para ello se han utilizado diferentes instrumentos disponibles en el laboratorio para simular, de la forma más precisa posible, como se comportarían los circuitos estando la placa conectada a la FEZ domino y sometidos a la radiación óptica que desprende un proceso de soldadura.

Para la caracterización se ha usado la fuente de alimentación Hewlett Packard (HP) E3611A con un voltaje de 3.3V (al igual que la placa FEZ domino) conectado a la alimentación de la placa y para realizar las medidas un osciloscopio HP 54645D. Por otro lado se han realizado pruebas con diferentes tipos de luz como se muestra a continuación.

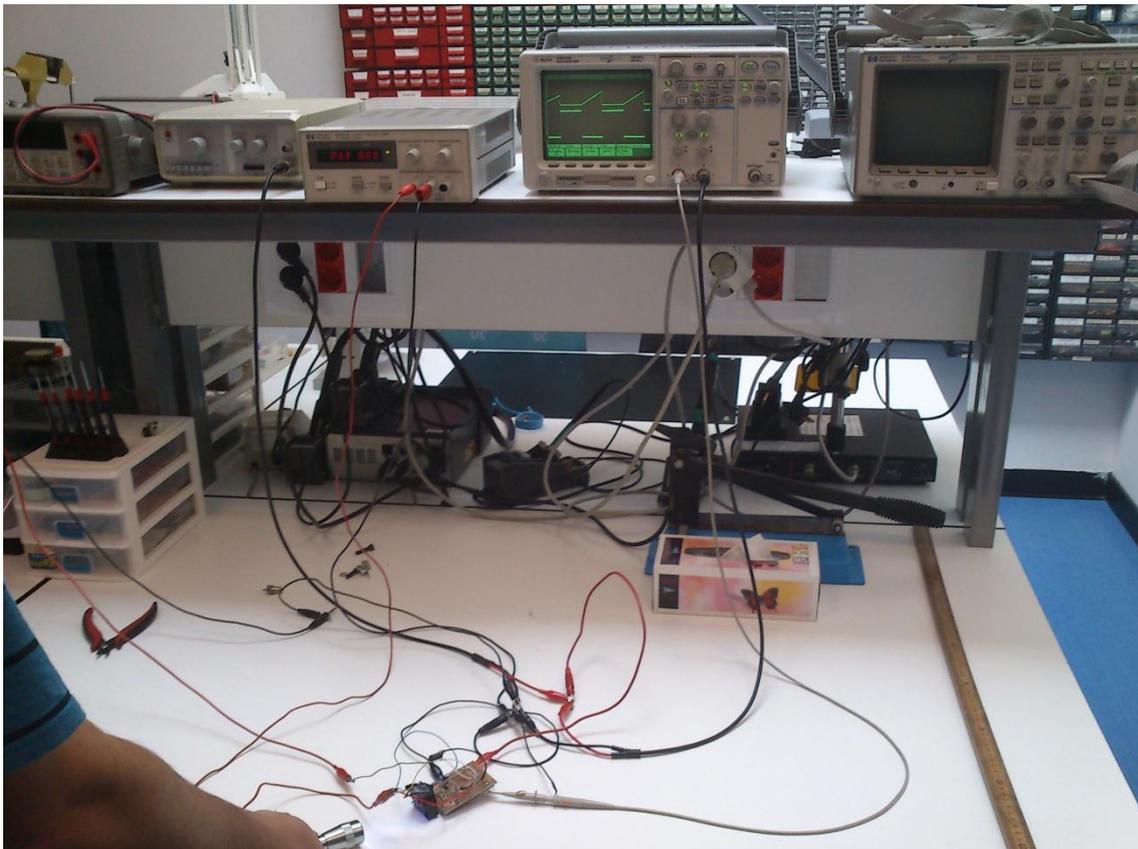


Figura 3.29 – Medidas en el laboratorio

Circuito 1: El proceso seguido para la caracterización de este circuito ha sido iluminar el fotodiodo con diferentes fuentes de luz, concretamente una linterna de luz blanca y un LED de color azul, y ver cómo evoluciona la tensión de salida.

El primer problema que se ha detectado reside en la dificultad para conseguir una buena conexión entre el fotodiodo y el conector BNC, puesto que los conectores se movían constantemente y resultó imposible el fijarlos correctamente a través de la soldadura con estaño. Por otro lado, el circuito 1 tenía una conexión de ánodo/cátodo opuesta a los circuitos 2 y 3, haciendo que la conexión fuese aún más compleja. La solución que se ha adoptado para los tres circuitos ha sido quitar los conectores BNC y soldar unos simples cables de los circuitos al fotodiodo.

Otro problema que ha habido que solucionar es la poca tensión de salida que se obtenía al medir debido a que, al iluminar el fotodiodo, éste producía una corriente de diferente valor al supuesto en los cálculos teóricos. Para poder solucionarlo se ha ido modificando el valor de las resistencias, hasta encontrar el valor de tensión de salida óptimo que ronda los 3.3V, dando como resultado el siguiente cambio:

$$R_{f1}=R2=3.3 \text{ k}\Omega \rightarrow R_{f1}=R2= 22 \text{ k}\Omega$$

$$R_{f2}=R1=12 \text{ k}\Omega \rightarrow R_{f2}=R1=68 \text{ k}\Omega$$

Al realizar estos cambios se pudo comprobar que se daban valores lógicos al realizar las pruebas con diferentes fuentes de luz:

	OSCURIDAD	LINTERNA BLANCA	LED AZUL
$V_O (R1)$	-13 mV	3.4 V	396 mV
$V_O (R2)$	-13 mV	3.4 V	74 mV

Para la caracterización con el LED azul se ha usado una fibra óptica entre el propio LED y el fotodiodo, por lo que se debe de tener en cuenta la atenuación que introduce la fibra.

Circuito 2: Al igual que en el circuito anterior, el fotodiodo ha sido sometido a diferentes fuentes de luz para poder ajustar de forma óptica los componentes del circuito.

En este circuito el único y gran problema ha sido variar el valor de las resistencias hasta alcanzar unos valores de tensión de salida lógicos y que se puedan ajustar al proceso de soldadura. En las primeras pruebas realizadas se ha obtenido unas tensiones de salida muy bajas, por lo tanto se ha ido aumentando el valor de las

resistencias hasta encontrar el punto de equilibrio entre unas y otras, dando como resultado los siguientes cambios:

$$R_f=(R_5+R_8)=11.2\text{ k}\Omega; R_5=5.6\text{ k}\Omega R_8=5.6\text{ k}\Omega \rightarrow R_5=R_8=120\text{ k}\Omega$$

Con estos componentes se ha podido obtener el siguiente resultado:

	OSCURIDAD	LINTERNA BLANCA	LED AZUL
$V_o$	40 mV	3.65 V	60 mV

Para la caracterización con el LED azul se ha usado una fibra óptica entre el propio LED y el fotodiodo, por lo que se debe de tener en cuenta la atenuación que introduce la fibra.

Circuito 3: En la caracterización de este circuito han surgido múltiples problemas, dando como resultado numerosos cambios en el mismo hasta el punto de cambiar casi por completo el circuito.

Al intentar realizar la primera prueba con luz blanca, la tensión de salida era nula. El primer fallo que se ha detectado ha sido que la resistencia R6 no debía de estar puesta por lo que se ha eliminado con un cortocircuito. Como la tensión de salida seguía siendo nula se ha optado por diseñar un divisor de tensión entre el amplificador y el ánodo, y se ha obtenido el siguiente diseño:

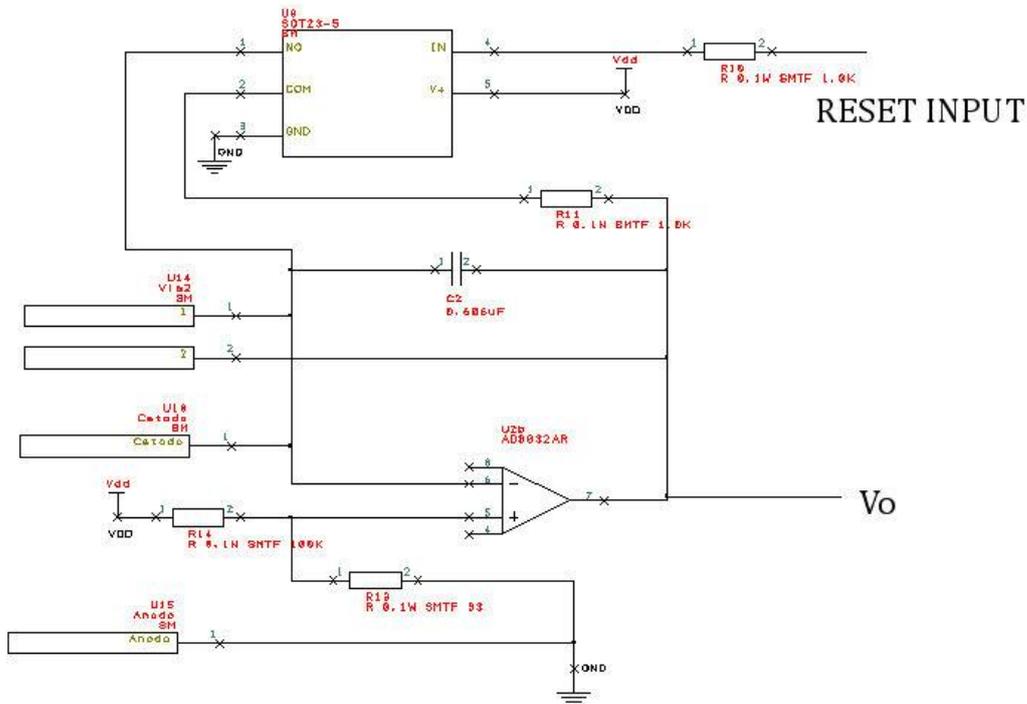


Figura 3.30 – Alternativa circuito 3

Una vez realizado los cambios, se ha vuelto a probar iluminando con luz blanca y esta vez sí se obtenía una tensión de salida, pero no como se esperaba. Al iluminar el fotodiodo el condensador integraba la corriente y se ha podido observar en el osciloscopio como éste se cargaba, pero cuando dejaba de incidir luz sobre el fotodiodo y sin llegar a activar el *reset*, el condensador también se descargaba solo; por lo que no funcionaba correctamente. Después de intentar solucionar el problema en numerosas ocasiones se llegó a la conclusión de que este circuito no se podía implementar alimentándolo con una sola toma de alimentación (*single-supply*), por lo que se ha decidido diseñar un nuevo circuito que sí se pueda implementar usando esta filosofía de diseño. Para ello, y tal y como se explica en el apartado 3.2.1, se ha decidido probar con el circuito "*Deboo*" *Single-Supply Integrator* de la empresa Maxim Integrated.

Haciendo un último esfuerzo se ha conseguido implementar dicho circuito de forma "rudimentaria" reusando parte del circuito 3 "viejo" tal y como se muestra en la figura siguiente:

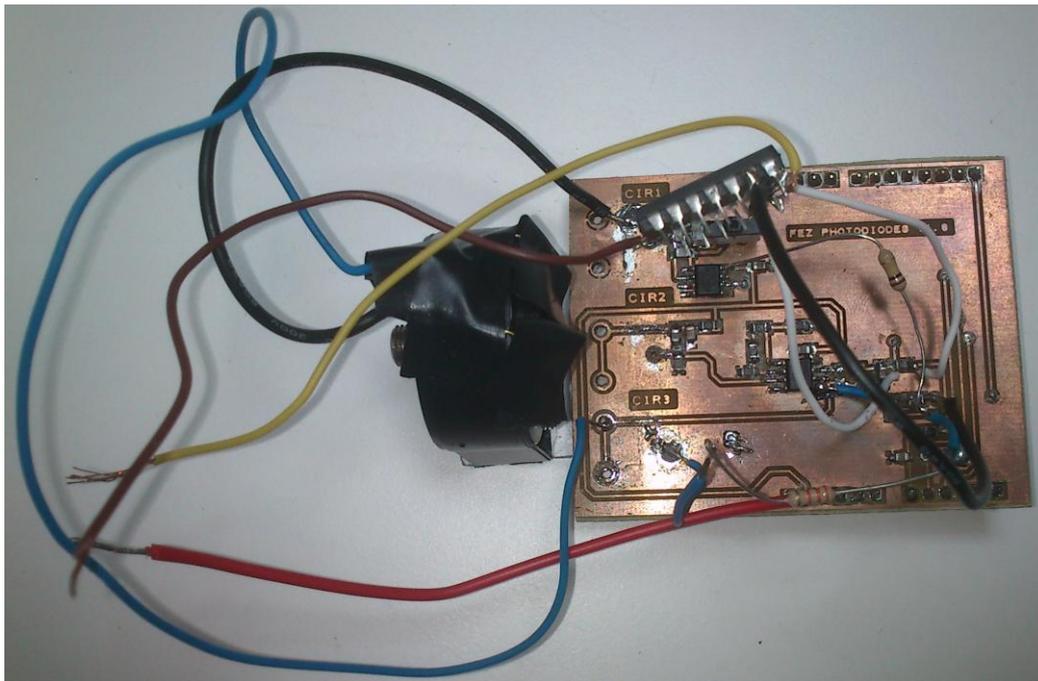


Figura 3.31 – nuevo circuito 3 V1.0

El resultado del nuevo montaje ha sido muy positivo, puesto que se ha conseguido la tensión de salida que se esperaba. El condensador se carga cuando se ilumina el fotodiodo con la luz y se descarga al aplicarse la señal de *reset*. Tal hecho se puede apreciar en la siguiente figura:

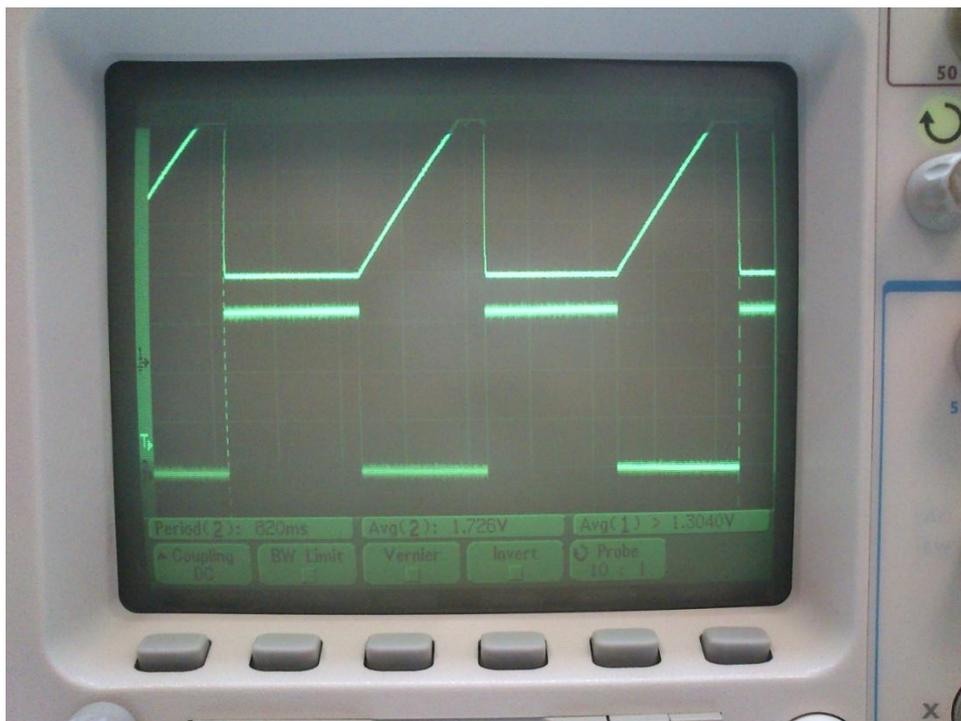


Figura 3.32 – Nuevo circuito 3 osciloscopio

### 3.2.3.2 FEZ PHOTODIODES V2.0

En la caracterización de la placa Fez photodiodes V2.0 se ha realizado otro tipo de comprobación similar a la de la versión anterior. Como a priori la placa debería funcionar perfectamente, puesto que así se comprobó con la primera versión, se ha conectado la placa a la FEZ Domino y ésta al ordenador. A través de un sencillo programa se puede controlar el tiempo de integración y se puede almacenar los datos recogidos de forma conveniente. Por lo tanto se ha hecho una comparativa, teniendo la placa conectada y alimentada a través de la FEZ Domino, entre la medida con un osciloscopio HP E3611A y la medida de la propia FEZ Domino.

Circuito 1: Previa realización de la comparativa, se ha comprobado que este circuito funciona correctamente como estaba planeado, y a continuación se han realizado las siguientes medidas:

	FEZ DOMINO		OSCILOSCOPIO	
	R1=68 kΩ	R2=22 kΩ	R1=68 kΩ	R2=22 kΩ
V <sub>o</sub> (LUZ BLANCA)	3.3 V	3.3 V	3.275 V	3.27 V
V <sub>o</sub> (OSCURIDAD)	0 V	0 V	15 mV	15 mV

Como se puede apreciar, la medida con el osciloscopio es prácticamente la misma que con la FEZ Domino.

Circuito 2: Tal y como se esperaba este circuito también funciona correctamente, por lo que se ha pasado a realizar las siguientes medidas:

	FEZ DOMINO	OSCILOSCOPIO
$V_o$ (LUZ BLANCA)	3.296 V	3.293 V
$V_o$ (OSCURIDAD)	0.3 mV	26.5 mV

En este caso la medida con osciloscopio también es similar a la medida de la FEZ Domino, midiendo unos valores aceptables.

Circuito 3: El primer problema con el que se ha topado es que el puerto digital *Di 0* que se usaba para controlar el *reset* digital a través de la FEZ Domino no se puede usar; esto es debido a que ese puerto digital solo se puede usar como conector serie entre la placa y el ordenador. Por lo tanto se ha modificado la placa usando el pin *Di 4* como controlador del *reset* digital. Por otro lado, el segundo y último problema que se ha encontrado es que al realizar la comprobación para ver si el circuito funcionaba correctamente, cuando se mide la tensión de salida, se observa un gran ruido que hace que la medida sea errónea. Por lo tanto se ha diseñado un filtro RC a la salida del circuito para eliminar ese ruido.



Figura 3.33 – Medida con ruido

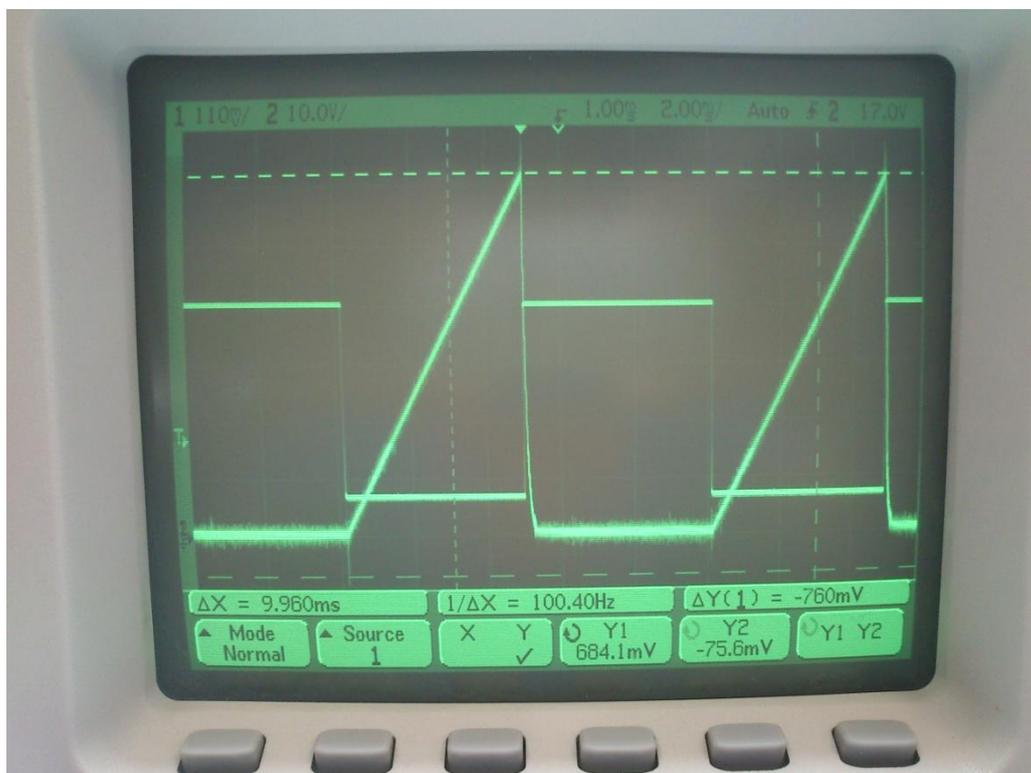


Figura 3.34 – Medida sin ruido

El filtro se ha diseñado para tener una frecuencia de corte de aproximadamente  $f_c=2$  kHz, concretamente:

$$R17=820\Omega \quad f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \approx 2 \text{ KHz} \quad (3.11)$$

$$C9=0.1 \mu\text{F} \quad f_c = \frac{1}{2 * \pi * 820 * 0,1 * 10^{-6}} = 1.94 \text{ KHz}$$

A continuación se ha decidido realizar la comparativa entre osciloscopio y FEZ domino pero esta vez se ha iluminado con un LED de color azul en vez de con luz blanca. Para las siguientes medidas se ha ido incrementando el tiempo de integración desde 1 ms hasta 100 ms:

TIEMPO INTEGRACIÓN		1 ms	5 ms	10 ms	15 ms	20 ms	25 ms	50 ms	75 ms	100 ms
$V_o$ OSCURIDAD	FEZ (mV)	0	0	3	7.5	14	23	54	90	125
	OSCILOSCOPIO (mV)	16	16	23	28.5	34.5	42	72	105	137
$V_o$ LED AZUL	FEZ (mV)	15.5	69.8	149.8	227	303.6	381.2	776.7	1273	1621
	OSCILOSCOPIO (mV)	48	93.5	173.8	251	325.5	402.5	797.5	1207	1632

Como se puede observar, en las medidas correspondientes a condiciones de oscuridad, la diferencia entre la FEZ y el osciloscopio es grande debido a que son tensiones muy bajas y cualquier pequeña variación da como resultado una gran diferencia. Pero aún así se puede afirmar que las variaciones de todas las medidas, con luz y sin luz, son aceptables.

A continuación se muestra una comparación entre la tensión de salida medida con la FEZ y la tensión medida con el osciloscopio en función del tiempo. Comparando ambas a la vez con una línea de tendencia, y se puede afirmar que los resultados son bastante buenos porque todas las líneas se aproximan bastante.

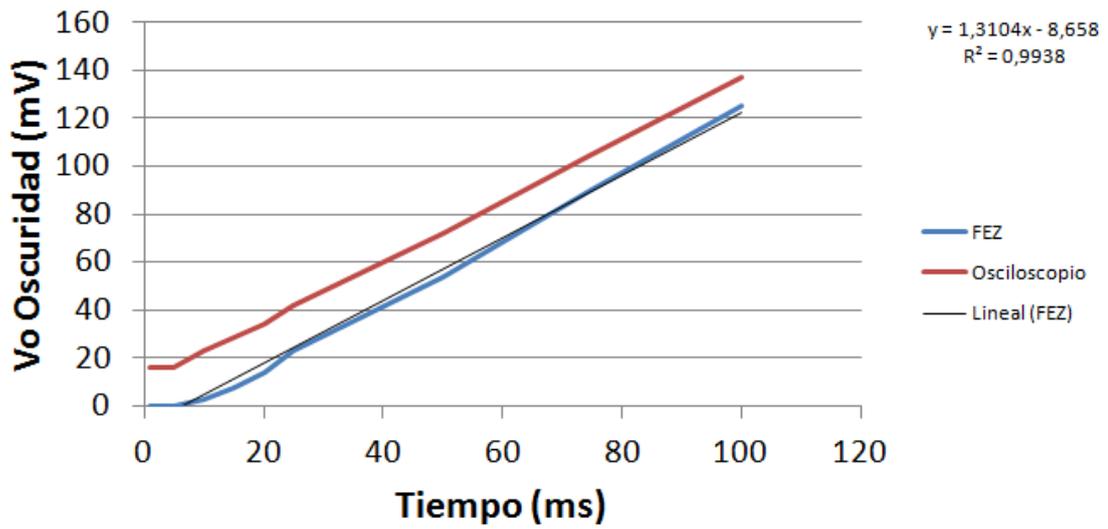


Figura 3.35 – Gráfica  $V_o$  oscuridad frente a tiempo

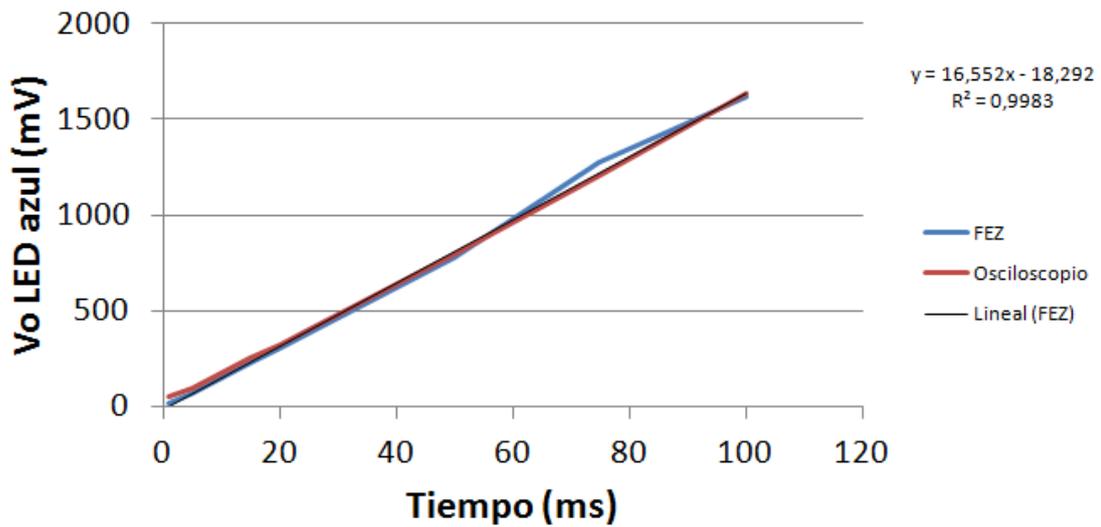


Figura 3.36 – Gráfica  $V_o$  LED azul frente a tiempo

## 4 – ENSAYOS EXPERIMENTALES

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Gracias a los ensayos experimentales se puede validar la realización de todo el proyecto y comprobar que el sistema de bajo coste que se ha diseñado funciona correctamente y es capaz de discernir los posibles fallos en un proceso de soldadura.

El montaje para la realización de los ensayos es una parte muy delicada para poder obtener un correcto funcionamiento de todo el sistema. Este montaje engloba principalmente dos partes, por un lado está la parte del proceso de soldadura y por otro lado está el sistema de bajo coste que se ha diseñado.

Para el proceso de soldadura, el montaje ya está muy controlado y responde de manera perfecta a lo que se pide mediante el programa *WeldStorm*. Tanto el montaje como el programa fue desarrollado por José Julián Valdiane Gutiérrez durante su proyecto fin de carrera titulado: *Control de instrumentación para la automatización de procesos de soldadura TIG* [10].

El *set up* de soldadura se puede dividir a su vez en tres partes. La primera corresponde al movimiento del sistema, que se puede controlar de forma remota a través del ordenador o bien de forma manual mediante los botones que lleva incorporado el panel frontal del controlador de motores *MM4005* de la marca *Newport* que controlan los motores *MTM100PP1* de la misma marca, encargados de realizar los movimientos. Produciéndose éstos en el eje vertical, la antorcha, y en el eje horizontal, la base donde se realiza la soldadura de las chapas.

La segunda parte del montaje corresponde al control del gas *Ar* de protección del arco que se utiliza durante el proceso de la soldadura. Este gas de protección es utilizado para evitar en la medida de lo posible la aparición de fenómenos de oxidación. El control de este gas se lleva a cabo mediante el ordenador.

Por último y no menos importante, la tercera parte se compone por la fuente de alimentación *Mastertig 2200* de *Kemppi*, que le proporciona la corriente y el gas necesarios a la antorcha *TTC 220*, también de la marca *Kemppi*, para que sea posible realizar la soldadura. El control de esta parte también está totalmente automatizado a través del programa *WeldStorm*.

La otra parte del ensayo es el montaje del sistema de bajo coste que consta de varios componentes como una fibra de *Ocean Optics* [11] de dos metros (se han usado dos tipos de fibra: Fibra 1 – 200  $\mu\text{m}$  de diámetro y Fibra 2 – 600  $\mu\text{m}$ ) para capturar la luz que se emite en el proceso de soldadura y transportarla hasta el fotodiodo, el propio sistema de portable de bajo coste, es decir, la placa diseñada “montada” sobre

la placa FEZ domino y un ordenador conectado a la placa a través de una conexión de puerto serie USB. Todo este montaje se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 4.1 – Setup de soldadura

Para el control de la placa FEZ domino se ha conectado ésta a través de un puerto serie y se ha usado el programa *Realterm* para controlar la FEZ Domino y poder sacar la información requerida.

Para poder comprobar si se cumple el objetivo de la detección de errores en el proceso de soldadura, a continuación se muestran los resultados de todos los circuitos tras haber sido sometidos a tres tipos de procesos de soldadura.

El primero es a priori un proceso correcto de soldadura, en el que se han usado los siguientes parámetros:

Distancia: 80 mm	Velocidad: 8 mm/s	Intensidad: 60 A	Gas protección: 100%
------------------	-------------------	------------------	----------------------

El segundo es un proceso con variaciones en la corriente de soldadura, concretamente:

- Cambio de intensidad entre la distancia 20 y 30 mm: Intensidad: 50 A
- Cambio de intensidad entre la distancia 50 y 60 mm: Intensidad: 40 A

Y el tercero y último es un proceso con corte de gas Ar de protección, concretamente:

- Cambio de gas de protección entre la distancia 20 y 25 mm: Gas Argón: 0%
- Cambio de gas de protección entre la distancia 55 y 60 mm: Gas Argón: 0%

Para los procesos de soldadura se han empleado chapas de 1 mm compuestas de acero inoxidable AISI-304.

## 4.2 CIRCUITO 1

Para las medidas tomadas en este circuito se ha utilizado un tiempo de captura de 1 ms, o lo que es lo mismo, se han realizado 1000 capturas por segundo.

R1:

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una soldadura nominal usando Fibra 1.

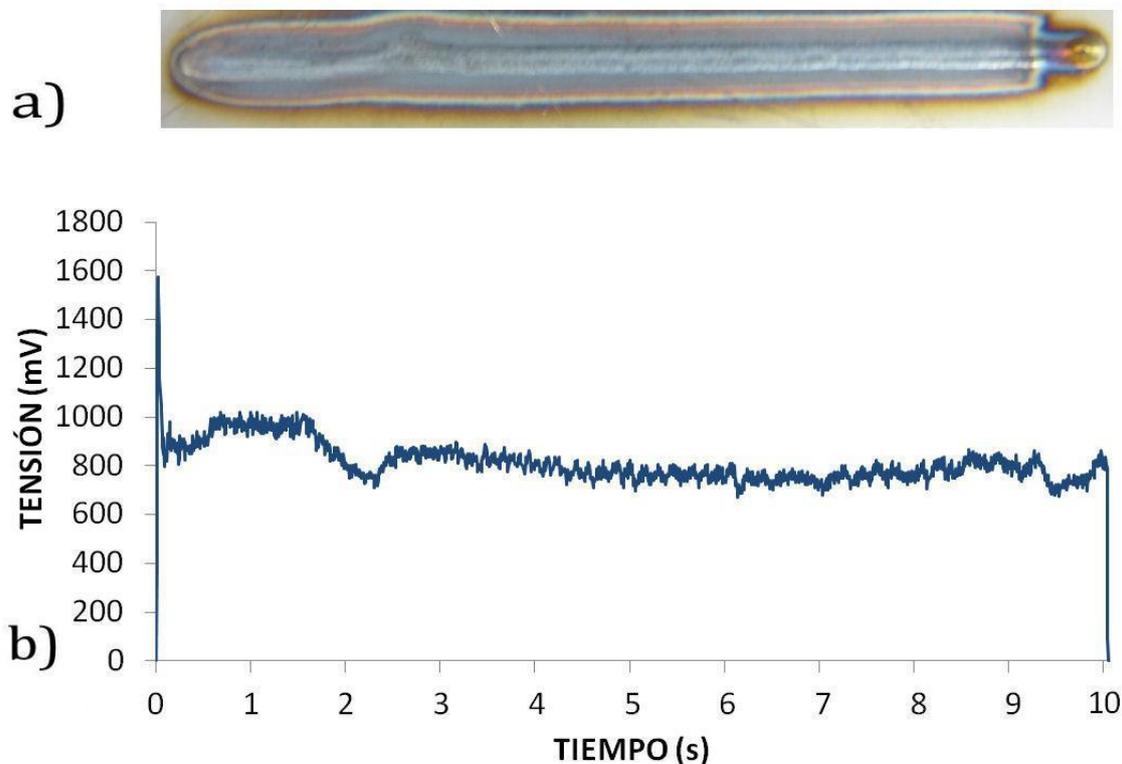


Figura 4.2 – Circuito1 R1 Nominal

Como se puede apreciar en el cordón, se ha realizado una soldadura correcta y sin defectos, y el resultado es un gráfico más o menos estable. El único punto de inestabilidad de la gráfica está en el inicio del proceso de soldadura debido a que por lo general el inicio de la soldadura es inestable de por sí. Este hecho se puede apreciar en todas las figuras de este apartado.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por variación de corriente usando Fibra 1.

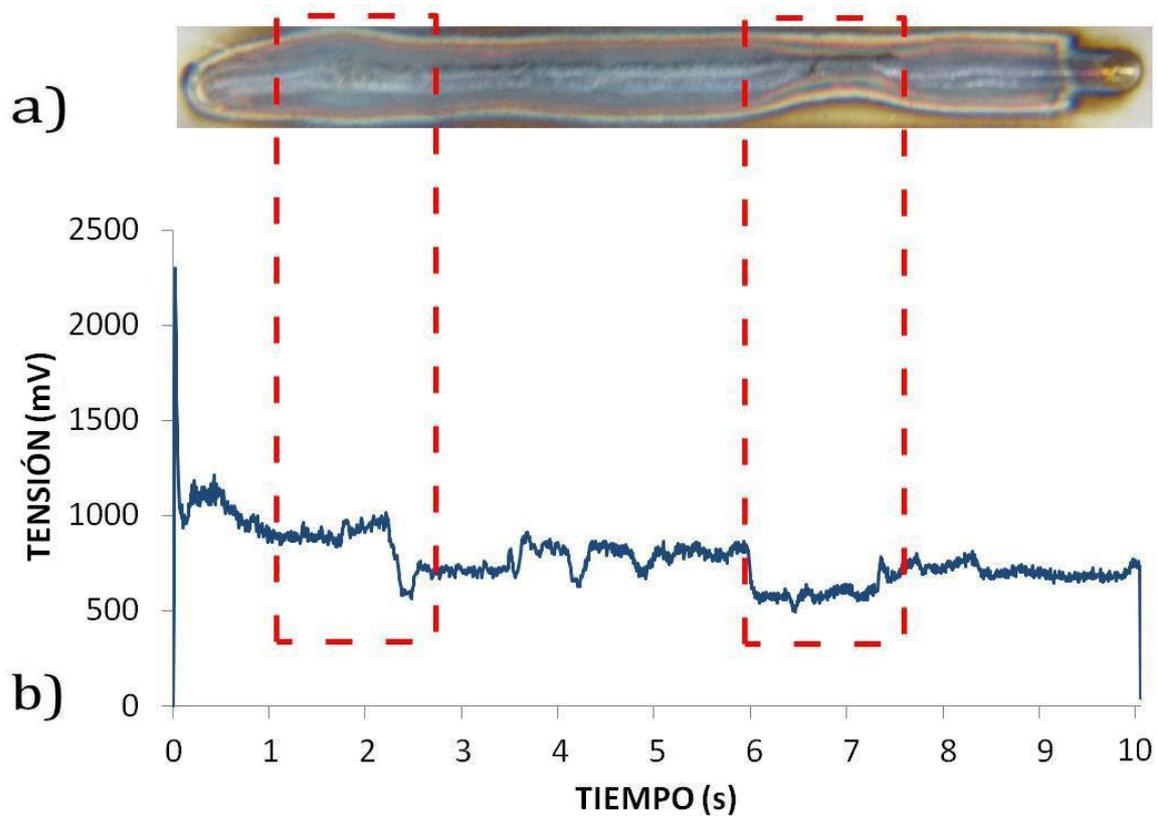


Figura 4.3 – Circuito1 R1 variación intensidad

En esta figura se puede apreciar como la primera bajada de corriente apenas es detectada por el sistema debido a que el cambio es muy leve, pero la segunda bajada es más fuerte y se puede apreciar a simple vista en el cordón, siendo además detectada por el sistema.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por corte de gas Ar de protección usando Fibra 1.

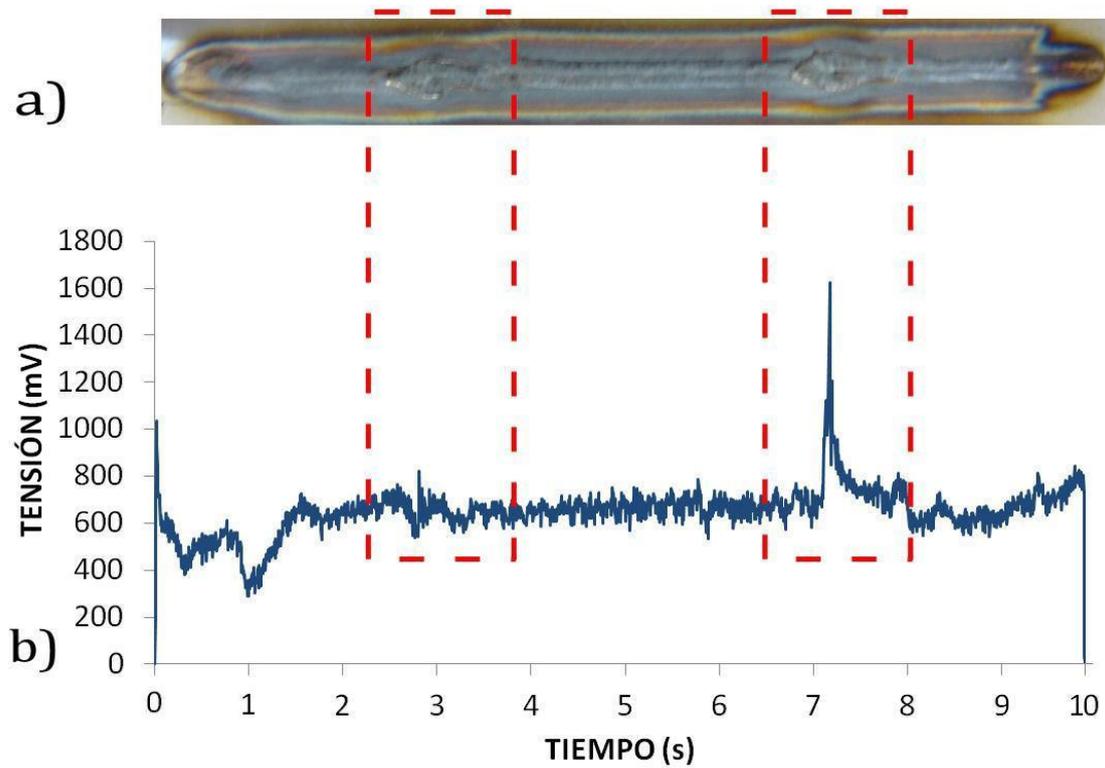


Figura 4.4 – Circuito1 R1 corte de gas

Cuando se realizan los cortes de gas de protección se puede observar en el cordón que ambos han producido sendos poros, estando asociados a los dos picos que se pueden observar en la gráfica, siendo el segundo pico más pronunciado.

R2:

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una soldadura nominal usando Fibra 2.

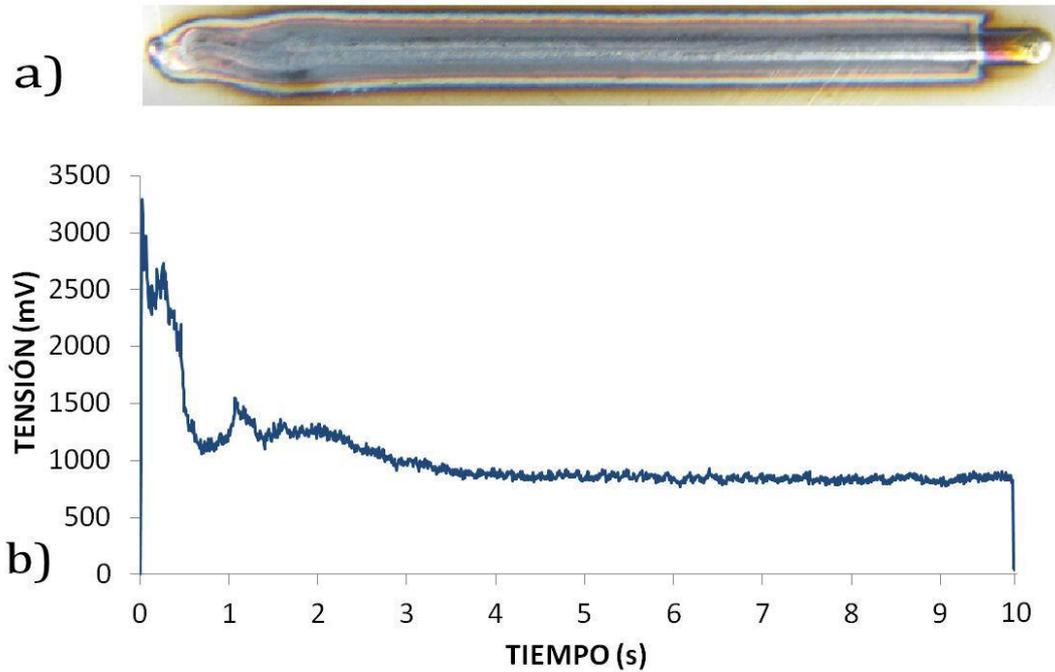


Figura 4.5 – Circuito1 R2 Nominal

En esta figura se puede observar la gran variación que produce la inestabilidad del inicio de la soldadura, siendo el resto muy estable.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por variación de intensidad usando Fibra 2.

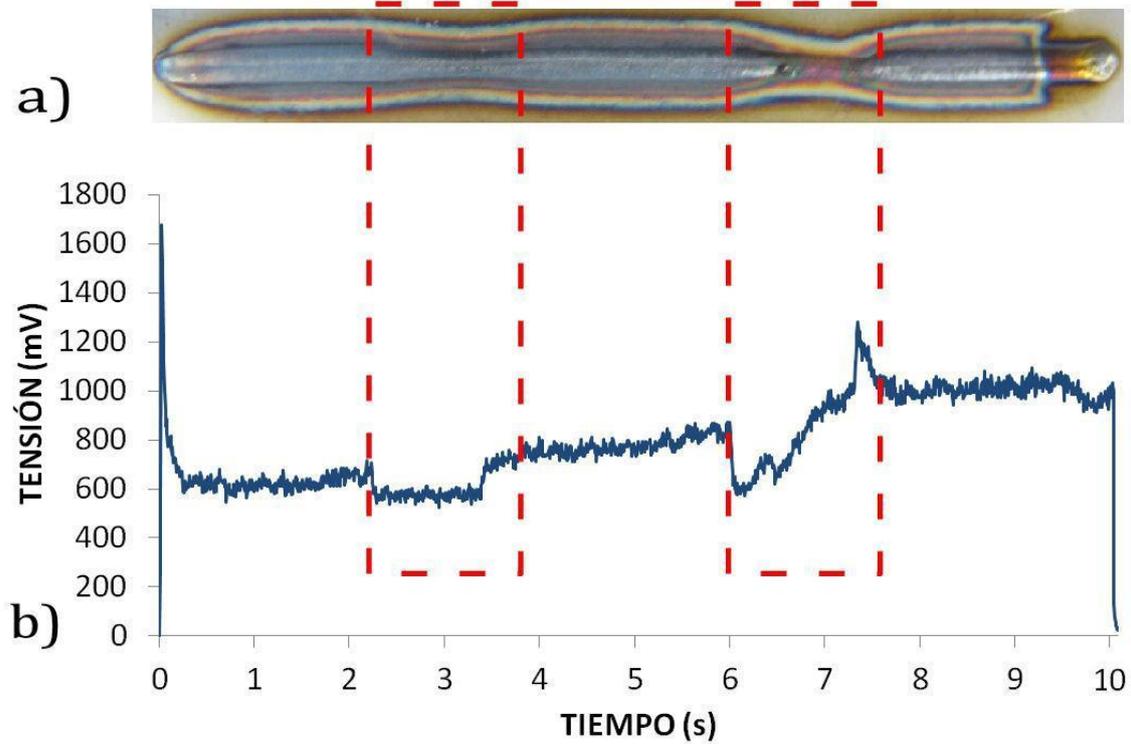


Figura 4.6 – Circuito1 R2 variación intensidad

Esta muestra es bastante aceptable, ya que se puede apreciar en el cordón como el primer cambio de corriente es más suave que el segundo, en el que se puede ver un defecto mucho mayor. Además, ello conlleva una proporción perceptible en la gráfica siendo el segundo cambio más abrupto que el primero.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por corte de gas Ar de protección usando Fibra 2.

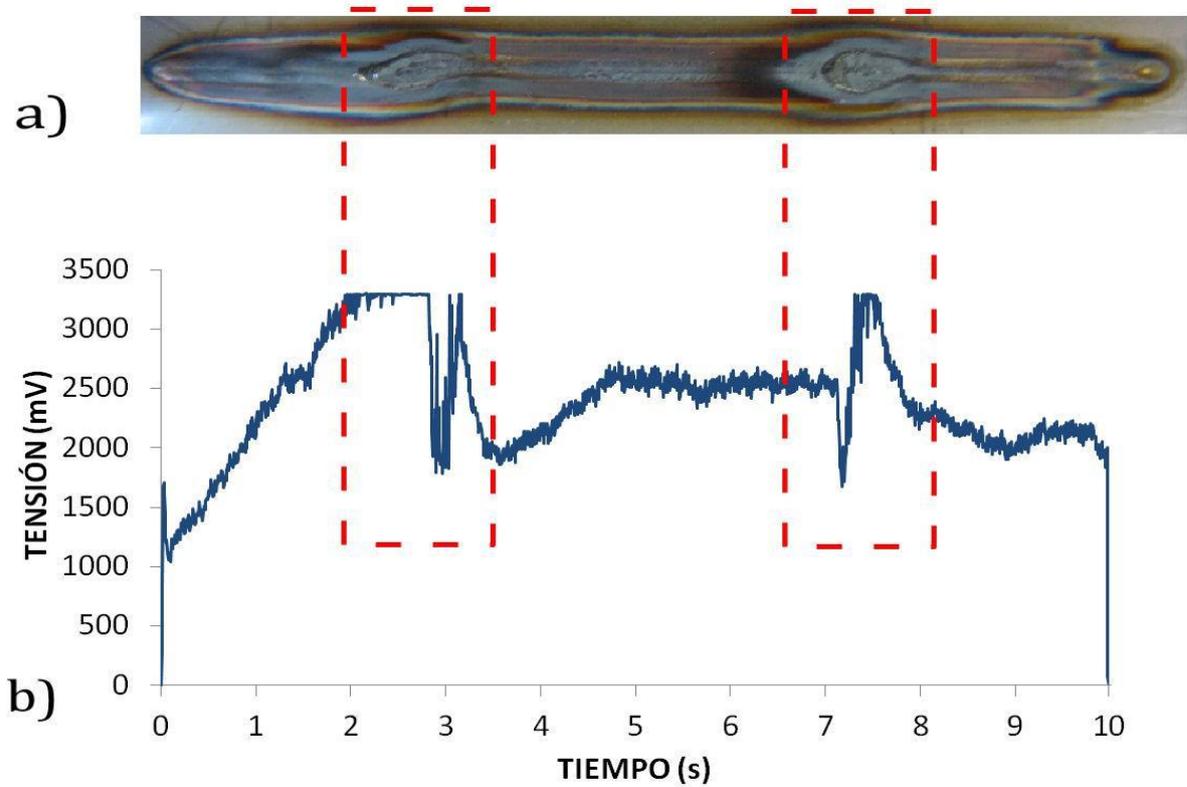


Figura 4.7 – Circuito1 R2 corte de gas

En este cordón se puede apreciar los dos poros producidos por los cortes de gas, que se han traducido en dos cambios bruscos de la señal, por lo que se puede decir que se han detectado correctamente los defectos.

## 4.3 CIRCUITO 2

Para las medidas tomadas en este circuito se ha utilizado un tiempo de captura de 1 ms, o lo que es lo mismo, se han realizado 1000 capturas por segundo.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una soldadura nominal usando Fibra 1.

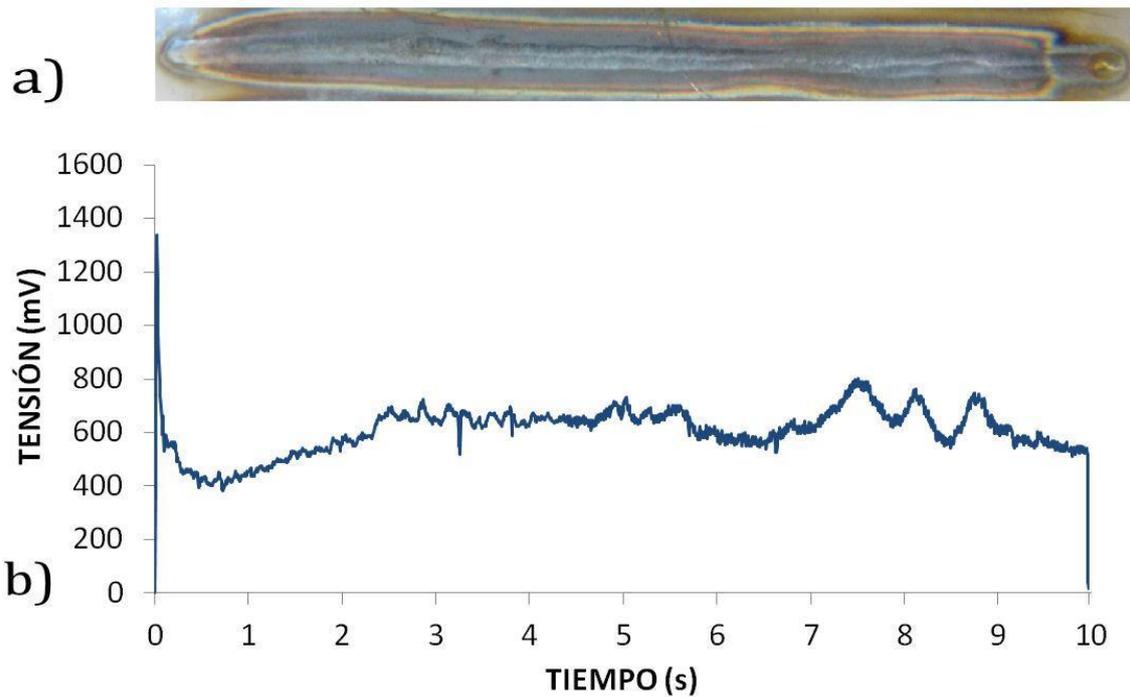


Figura 4.8 – Circuito2 Nominal

Se puede apreciar en la gráfica como a pesar de ser una soldadura correcta, la gráfica no es muy estable.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por variación de intensidad usando Fibra 1.

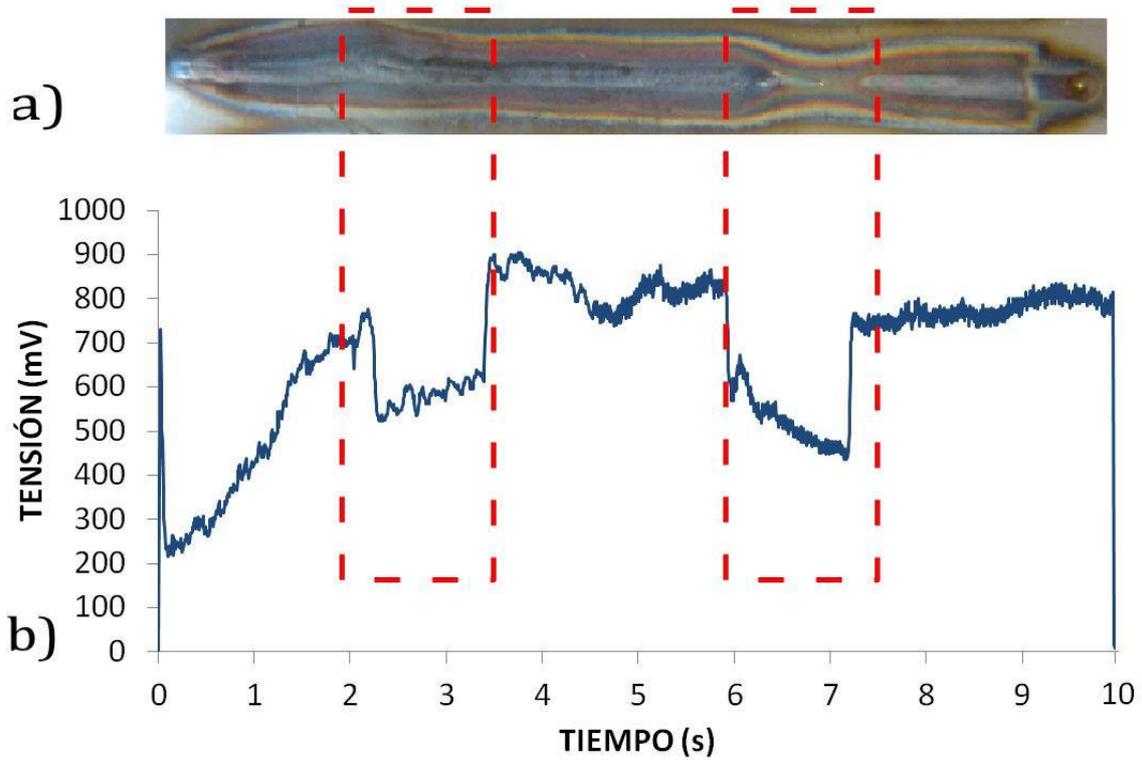


Figura 4.9 – Circuito2 variación intensidad

A pesar de la inestabilidad de la prueba con un cordón sin defectos, en esta figura se puede observar como la variación de intensidad introducida ha producido dos cambios muy apreciables en la gráfica, por lo que sí detecta los defectos.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por corte de gas Ar de protección usando Fibra 1.

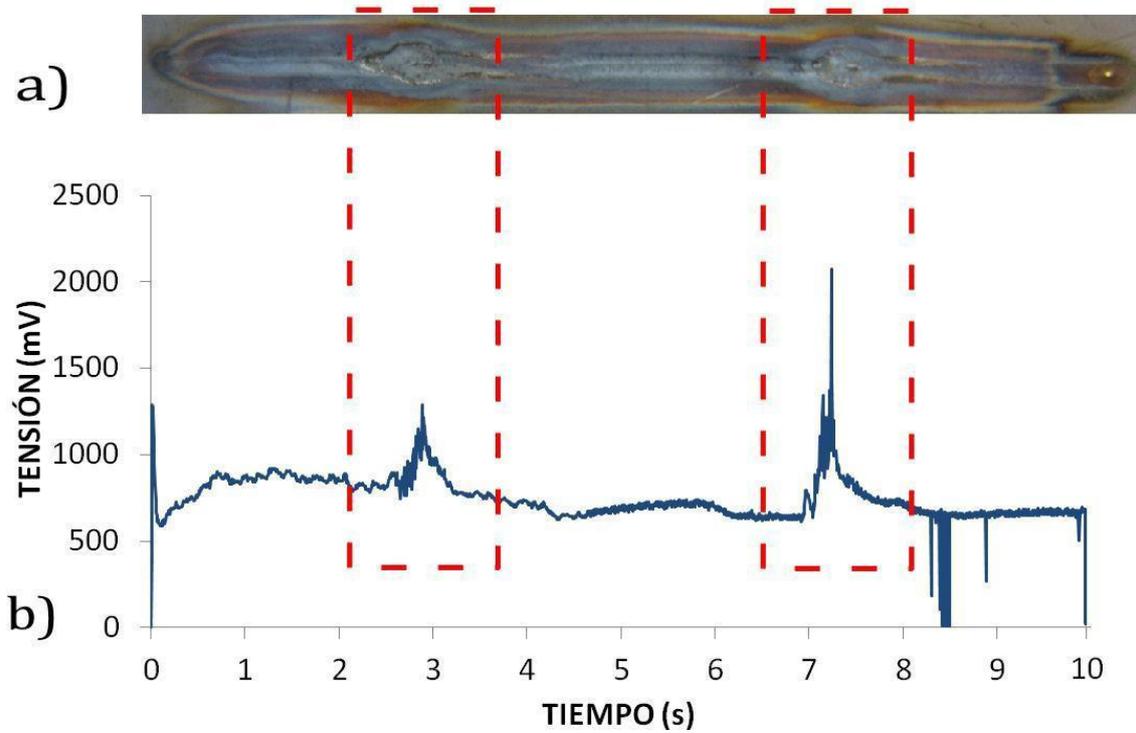


Figura 4.10 – Circuito2 corte de gas

En este caso se puede observar en la gráfica cómo se han producido dos picos debidos a sendos cortes de gas de protección.

## 4.4 CIRCUITO 3

Para las medidas tomadas en este circuito se ha utilizado un tiempo de captura de 20 ms, o lo que es lo mismo, se han realizado 50 capturas por segundo.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una soldadura nominal usando Fibra 2.

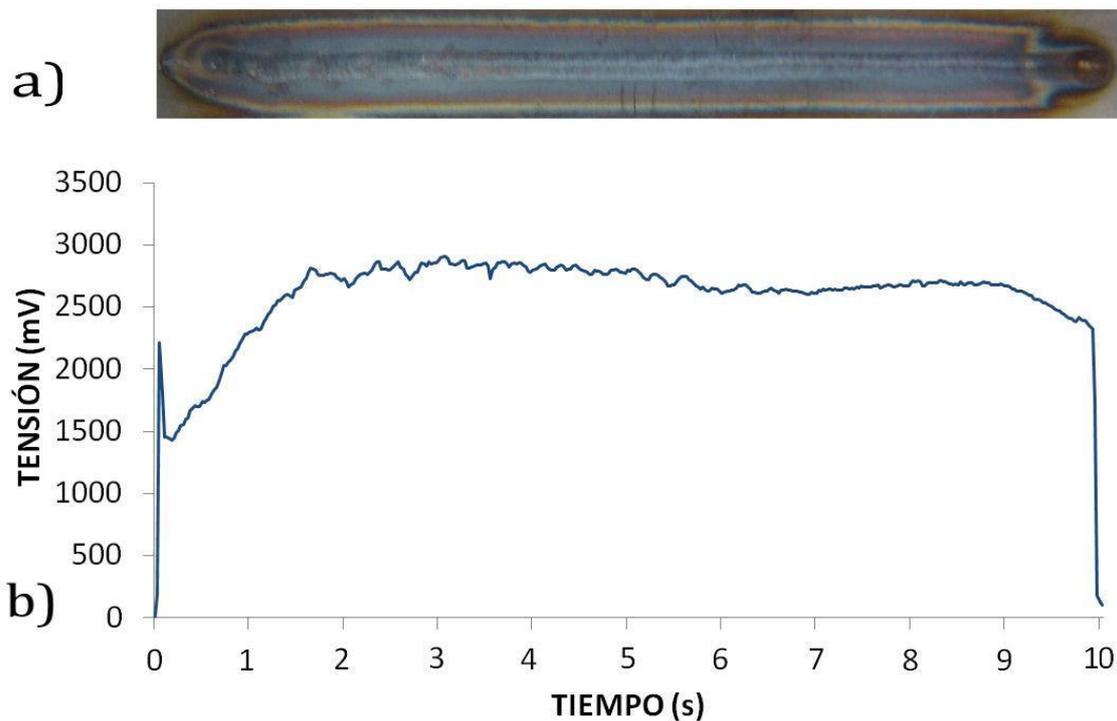


Figura 4.11 – Circuito3 Nominal

La primera prueba que se ha realizado con el circuito tres ya demuestra que se produce una señal mucho más definida. También se puede comprobar que, al no haber defectos, devuelve una señal muy estable.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por variación de intensidad usando Fibra 2.

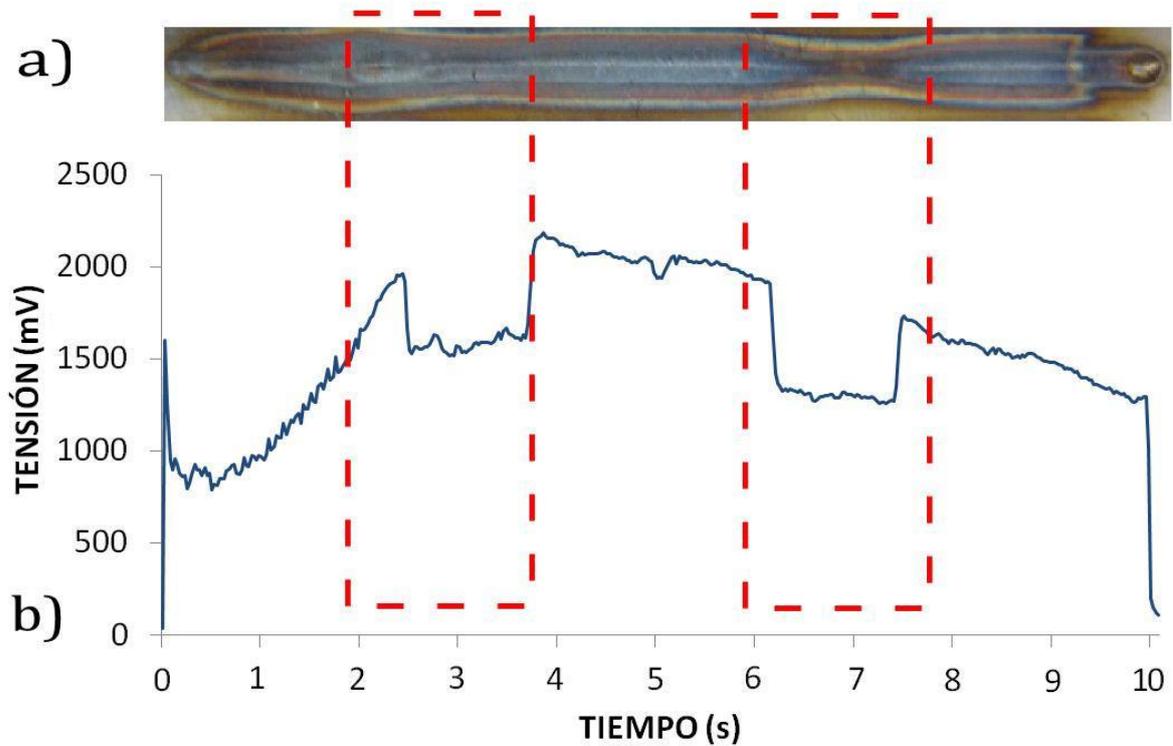


Figura 4.12 – Circuito3 variación intensidad

En esta figura se puede comprobar cómo el sistema detecta los fallos producidos por los cambios de corriente, que son también notables cuando se observa el cordón de soldadura.

- Respuesta del dispositivo de detección de defectos ante una simulación de un fallo por corte de gas Ar de protección usando Fibra 2.

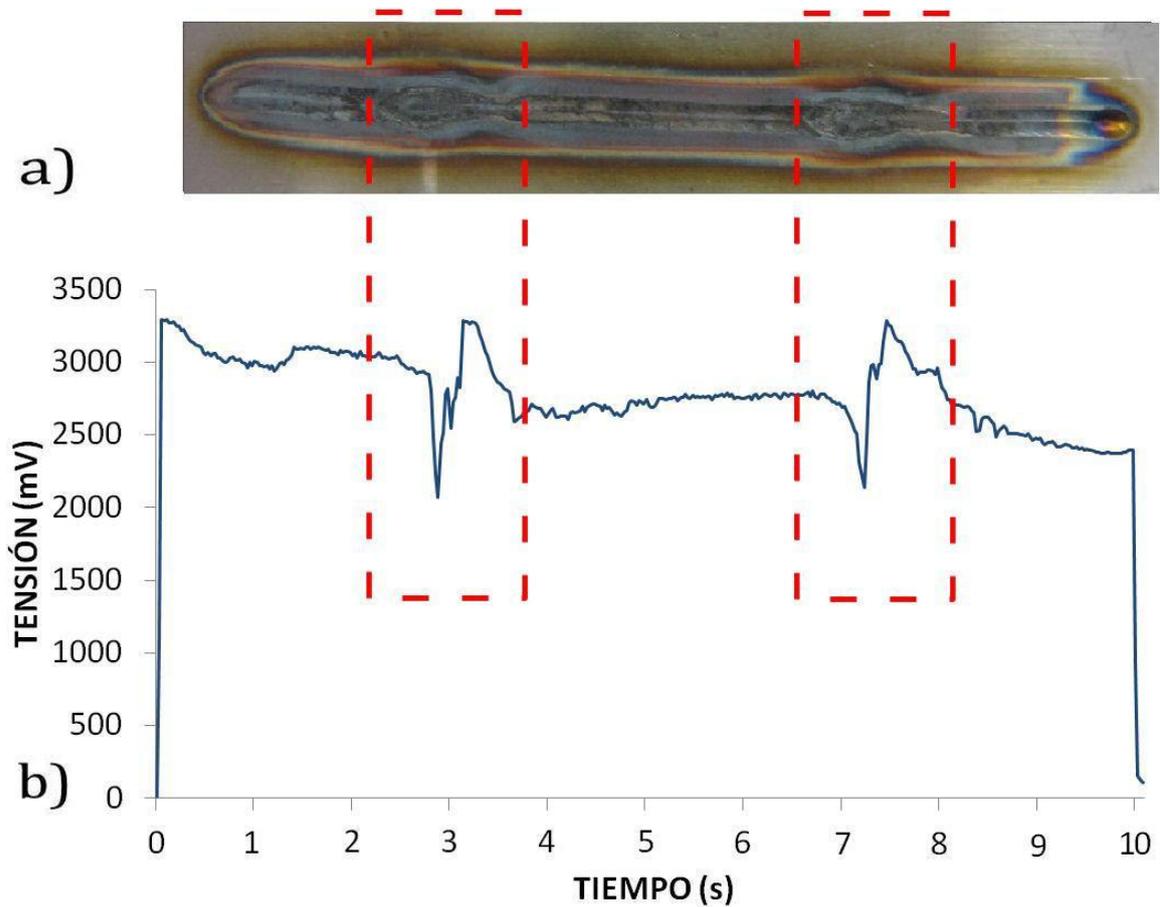


Figura 4.13 – Circuito3 corte de gas

Para finalizar, se ha realizado el ensayo con los cortes de gas de protección para el circuito 3 dando buenos resultados. Se puede apreciar a simple vista que los cortes de gas han producido en el cordón dos poros, siendo éstos perfectamente detectados por el sistema como se puede apreciar en la gráfica.

## 5 – CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un estudio sobre las diferentes opciones de electrónica para el control y el tratamiento de la señal proporcionada por un fotodiodo utilizado para la monitorización de la calidad de procesos de soldadura en tiempo real por medio de la espectroscopía óptica de plasmas.

Para realizar un análisis más profundo, se ha diseñado y fabricado un sistema portable basado en diferentes opciones de circuitos en una placa que se ha “montado” sobre una plataforma hardware *opensource* de bajo coste (placa FEZ Domino) que permite su programación mediante el entorno .NET de Microsoft.

Para la validación de los diseños se ha realizado una parte experimental (Capítulo 4) en la que se demuestra que se puede detectar defectos en los procesos de soldadura en tiempo real mediante la utilización de un sistema portable basado en un fotodiodo junto con una electrónica diseñada para tal propósito, todo ello “montado” sobre la citada placa FEZ Domino.

Después de la realización de todo el proyecto se ha llegado a la conclusión de que el Circuito 1 es capaz de detectar los defectos de un proceso de soldadura, pero éste depende excesivamente de la resistencia que acompaña al amplificador, por lo que el diseño con la resistencia  $R2$  ha ofrecido un mejor rendimiento.

Por otro lado el Circuito 2 también ha sido capaz de detectar los defectos, pero la monitorización resultante no ha sido del todo óptima debido a que la mayoría de las gráficas resultantes resultaban bastante ruidosas.

Por último, se ha podido comprobar que el Circuito 3, como era de esperar, detecta perfectamente todos los defectos propuestos de forma óptima, dando como resultado una señal en la monitorización muy limpia y estable.

Por lo tanto, queda demostrado que se puede realizar una monitorización en tiempo real de un proceso soldadura con un sistema portable de bajo coste basado en fotodiodos.

## 5.1 LINEAS FUTURAS

El presente proyecto deja abiertas diferentes líneas futuras de trabajo, como son:

- Nueva versión de la placa mejorando la creada, incluyendo:
  - Un fotodiodo *RGB* (rojo, verde y azul) integrado dentro de la misma placa.
  - Un LED blanco para iluminar las superficies a analizar.
  - Una pequeña pantalla para ver los comandos.
  - Una carcasa de plástico que ofrezca compactibilidad al sistema portable.
- Análisis de otras opciones de electrónica compatibles con el objetivo propuesto.
- Mejora del programa de la placa FEZ Domino para la monitorización en tiempo real de los procesos de soldadura.
- Control del *Set up* de soldadura a través de la placa FEZ domino.
- Creación de un algoritmo para el hardware utilizado de detección automática de defectos con el sistema de bajo coste realizado.
- Creación de un algoritmo para el hardware utilizado que sea capaz de comparar un proceso de soldadura correcto realizado previamente, con los procesos que se realicen a continuación para la optimización de la detección de defectos.

## ANEXO

A continuación se muestra parte de los componentes empleados para la realización del sistema portable junto a su información técnica.

### FOTODIODO

*Edmund Optics*

Stock Nº: NT53-378

*Silicon Detector, Blue Enhanced Response, 5.1 mm<sup>2</sup>*



type	Unbiased: Blue Enhanced Response Quartz Window
Operating Temperature (°C)	-40 to 100
Length of Leads (inches)	1.5
Outer Diameter (inches)	0.36
Typical Applications	Low light levels, wide spectral bandwidth response
Voltage Bias, $V_{Bias}$ (V)	0
Active Area (mm <sup>2</sup> )	5.1
Responsivity @ 410nm (A/W)	0.2
Noise Equivalent Power NEP (W/Hz <sup>1/2</sup> )	$5.2 \times 10^{-14}$
Detectivity (cmHz <sup>1/2</sup> /W)	$4.34 \times 10^{12}$ @ 0V, 410nm
Terminal Capacitance (pF)	450 @ 0V
Saturation Current, $I_{sat}$ (mA)	2.0
Shunt Resistance (MΩ)	150
Rise Time (μs)	0.2 @ 0V/50Ω, 410nm
Mount	TO-5
RoHS	Compliant

## PLACA FEZ DOMINO



**Package:** Arduino Duemilanove pin-out compatible with 8 more IOs

**Dimensions:** 2.67" x 2.08" (6.8cm x 5.3cm)

**Core Processor:** 72Mhz 32-bit ARM

**Processor:** USBZi-144 Chipset

**User free FLASH:** About 148KB

**User free RAM:** About 62KB

**Color TFT Controller:** No

**Graphics:** Minimal

**TCP/IP:** TCP client/server, UDP, DNS, DHCP, using WIZnet W5100, with up to four simultaneous sockets.

**Ethernet (wired networking):** Using Ethernet shield (WIZnet W5100 chip).

**Programmable IOs:** 30

**PWM:** 6

**Analog Input:** 6

**Analog Output (with audio playback capability):** 1

**UART (COM):** 3 TTL

**SPI:** 2

**I2C:** Yes

**CAN:** 1

**One-wire (on any IO):** √

**USB Host:** HUB, joystick, keyboard, mouse, printer, CDC, virtual serial and custom

**USB Client (Device):** Debugging, custom or Emulates keyboard, mouse or CDC

**SD/MMC Card support with SDHC support (i.e. capable of reading over 2GB cards):**

4-bit SD bus with SDHC support. A built-in micro SD connector is available.

**Real Time Clock (RTC):** Built in

**Battery backup RAM:** 2KB

**User Application Protection:** Yes

**In Field Update:** Yes (application only)

**Active Power Consumption:** 110mA

**Idle Power Consumption:** 65mA

**Hibernate:** 12.5mA

**Operating Temperatura:** -40° to +85°

**Lead Free, RoHS Compliant:** Yes

**Debug Interface:** USB, Serial

**RLP support (Runtime Loadable Procedures):** v

**Internal FLASH Storage:** 4 KB direct

**Weight:** 0.9 oz

## REFERENCIAS

1. <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/ensayos-de-materiales-y-no-destructivos/ensayos-no-destructivos/>
2. <http://www.ghielectronics.com/catalog/product/133>
3. <http://en.wikipedia.org/wiki/Welding>
4. Dennis Harwig y Robin Gordon. "Welding Research Trends in the United States". *ASM international* 2003.
5. J. Mirapeix, R. Ruiz-Lombera, J.J. Valdiande, L. Rodriguez-Cobo, F. Anabitarte, A. Cobo. "Defect detection with CCD-spectrometer and photodiode-based arc-welding monitoring systems". *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 2132–2139.
6. [http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/si\\_pd\\_circuit\\_examples.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/si_pd_circuit_examples.pdf)
7. <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/1155>
8. <http://www.edmundoptics.com>
9. <http://www.designspark.com/pcb>
10. José Julián Valdiande Gutiérrez. "Control de instrumentación para la automatización de procesos de soldadura TIG". PFC.
11. <http://www.oceanoptics.com/Products/opticalfibers.asp>