



Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas 2.5 España de Creative Commons. Puede copiarlo, distribuirlo y transmitirlo públicamente siempre que cite al autor y la obra, no se haga un uso comercial y no se hagan copias derivadas. La licencia completa se puede consultar en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/es/deed.es>.

**UNIVERSIDAD OBERTA DE CATALUNYA**

**INGENIERÍA TÉCNICA EN TELECOMUNICACIONES**

**ESPECIALIDAD TELEMÁTICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL**

**Alumno:** Miguel Ángel Montesinos Lara

**Dirigido por:** Asier Ibeas Hernández

**CURSO 2010-11 (Febrero)**

## **AGRADECIMIENTOS**

*En primer lugar quisiera agradecer a mi familia, mi mujer Mari Carmen y mis dos hijas, Carmen y Ángela, por haber aguantado todo el tiempo que he estado ausente y no haber estado a la altura de poder llevar trabajo, familia y estudios.*

*A mis amigos y compañeros de trabajo por su apoyo continuo y animarme en los momentos más importantes.*

*A los compañeros de estudios y consultores por los conocimientos que he adquirido y en particular a Asier Ibeas, que gracias a su ayuda, he podido llevar a cabo este trabajo.*

*A mis padres, hermanos y sobrinos por el empuje que me han ido dando a lo largo de este tiempo. Pero, sobre todo, a mi padre, que vive con la ilusión de verme terminar la carrera.*

*Gracias*

## RESUMEN

El presente trabajo presenta la realización del Trabajo Final de Carrera cuya funcionalidad es la realización de un diseño de un sistema de evaluación de la integridad estructural. Este diseño se caracterizará principalmente por evaluar la estructura de una viga voladizo de hormigón o de hierro.

En el desarrollo del proyecto, se ha tenido en cuenta las deformaciones que se pueden producir en una estructura por diferentes causas como carga, fatiga, corrosión, desgaste, etc., pudiendo generar flexiones o rotura en la viga. Para ello, se ha determinado un límite elástico, tanto para el acero como para el hormigón, para detectar deformaciones de seguridad, informarnos del estado de la estructura y así poder actuar antes de que se produzca alguna distorsión.

El elemento elegido para detectar estas deformaciones es la galga extensométrica. Este dispositivo va adherido a la viga voladizo y cuando se produce una alteración en la estructura, el transductor se deforma de manera proporcional a la viga que, alimentado eléctricamente, proporciona una señal acorde a su deformación.

Para que este sensor nos dé información sobre su estado, se ha realizado diferentes estudios de distintos componentes eléctricos y electrónicos donde, la unión de estos elementos de manera ordenada, ha finalizado con la señalización de un sistema de alarma donde nos avisará si la estructura se encuentra en un estado seguro, aceptable o peligroso.

Estos componentes han sido la realización de un circuito de medida para deformaciones, compuesto por un puente de *Wheatstone*; el diseño de una etapa amplificadora, donde se ha estudiado el funcionamiento del amplificador de instrumentación; un circuito discriminador, donde se ha elegido un circuito analógico compuesto por comparadores y divisores de tensión; el diseño de un módulo de alarma, donde están incluidos en este circuito elementos como puertas lógicas, LED, diodos y relés; y por último, se ha procedido a diseñar una placa electrónica compuesta por todos los elementos anteriormente descritos.

La realización de este circuito ha finalizado para detectar deformaciones de la viga tanto si se produce de manera vertical como deformaciones en horizontal. Para ello, se ha realizado una valoración económica donde se ha incluido costes tanto de implementación, desarrollo como tecnológico de dos placas electrónicas iguales.

# ÍNDICE

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

LICENCIA.....	1
PORTADA.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN .....	4
ÍNDICE.....	5
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS .....	7
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1 OBJETIVOS .....	10
1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	10
1.3 TAREAS, PLANIFICACIÓN, HITOS.....	11
1.3.1 Tareas y actividades.....	12
1.3.2 Calendario de trabajo.....	14
1.3.3 Planificación.....	15
1.3.3.1 <i>Diagrama de Gantt</i> .....	17
1.4 MATERIAL.....	17
1.5 INCIDENCIAS, RIESGOS Y PLAN DE CONTINGENCIA.....	18
1.5.1 Avería de la estación de trabajo .....	18
1.5.1.1 <i>Plan de contingencia</i> .....	18
1.5.2 Solapamiento de la entrega de alguna PEC con entregas de otras asignaturas.....	18
1.5.2.1 <i>Plan de contingencia</i> .....	18
1.5.3 Vacaciones .....	18
1.5.3.1 <i>Plan de contingencia</i> .....	18
1.7 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	19
<b>CAPITULO 2. ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.....</b>	<b>20</b>

2.1 DESCRIPCIÓN .....	20
2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	20
2.3 LIMITACIONES.....	22
2.4 TIPOS DE GALGAS.....	23
2.5 CARACTERÍSTICAS .....	23
2.6 COMPARATIVA.....	24
2.7 ELECCIÓN DE GALGA.....	24
<b>CAPITULO 3. DISEÑO DEL CIRCUITO DE MEDIDA DE DEFORMACIONES.....</b>	<b>28</b>
3.1 PUENTE DE WHEATSTONE.....	28
3.1.1 Puente de medida con una galga.....	29
3.1.2 Puente de medida con dos galgas.....	30
3.1.3 Puente de medida con cuatro galgas.....	30
3.2 ELECCIÓN CIRCUITO DE MEDIDA.....	31
<b>CAPITULO 4. DISEÑO DE LA ETAPA AMPLIFICADORA.....</b>	<b>35</b>
4.1 DEFINICIÓN .....	35
4.2 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN.....	35
4.3 CÁLCULOS DE LA ETAPA AMPLIFICADORA.....	39
<b>CAPITULO 5. DISEÑO DEL CIRCUITO DISCRIMINADOR .....</b>	<b>42</b>
5.1 COMPARADOR.....	42
5.2 DIVISOR DE TENSIÓN.....	43
5.3 CÁLCULOS DEL CIRCUITO DISCRIMINADOR.....	44
5.3.1 Cálculos de deformaciones en viga.....	44
<b>CAPITULO 6. DISEÑO MÓDULO DE ALARMAS .....</b>	<b>47</b>
6.1 CONTITUCIÓN DEL MODULO DE ALARMA .....	47
<b>CAPÍTULO 7. DISEÑO DEL LAYOUT DE LA PLACA DEL CIRCUITO.....</b>	<b>49</b>
<b>CAPÍTULO 8. COSTE DEL PROYECTO.....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>57</b>

## INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### Índice de figuras

Figura 1: Ilustración de una viga voladizo.....	9
Figura 2: Esquema ilustrativo de una galga extensométrica.....	9
Figura 3: Diagrama de bloque funcional .....	10
Figura 4: Galga extensométrica.....	11
Figura 5: Galga aumentando de longitud.....	11
Figura 6: Puente de <i>Wheatstone</i> .....	11
Figura 7: Ilustración galga extensométrica .....	20
Figura 8: Cambio de longitud de un hilo conductor.....	21
Figura 9: Deformación de una galga.....	21
Figura 10: Diagrama de tensión deformación de una galga.....	22
Figura 11: Galga metálica.....	23
Figura 12: Galga semiconductora .....	23
Figura 13: Galga extensométricas seleccionada.....	25
Figura 14: Diagrama tensión-deformación del acero.....	26
Figura 15: Diagrama tensión-deformación del hormigón.....	26
Figura 16: Diagrama limites elasticos y tensiones máximas .....	27
Figura 17: Esquema puente de <i>Wheatstone</i> .....	28
Figura 18: Puente de <i>Wheatstone</i> con una galga .....	29
Figura 19: Puente de <i>Wheatstone</i> con dos galgas.....	30
Figura 20: Linealidad del puente con cuatro galgas .....	31
Figura 21: Puente de <i>Wheatstone</i> con cuatro galgas.....	31
Figura 22: Configuración de puente de <i>Wheatstone</i> con cuatro galgas.....	32
Figura 23: Situación de las galgas en la estructura .....	32
Figura 24: Colocación de las galgas para deformaciones verticales.....	32
Figura 25: Amplificador de instrumentación.....	35
Figura 26: Rechazo en modo común en amplificador de instrumentación.....	36
Figura 27: Circuito esquemático del amplificador de instrumentación.....	36
Figura 28: Amplificador INA327 .....	38
Figura 29: Grafica tensión-resistencia.....	41
Figura 30: Circuito de medida con etapa amplificadora .....	41
Figura 31: Circuito discriminador analógico.....	42
Figura 32: Amplificador básico .....	42
Figura 33: Comparador de tensión.....	43

Figura 34: Gráfica de la tensión de salida del comparador .....	43
Figura 35: Divisor de tensión .....	44
Figura 36: Circuito discriminador.....	46
Figura 37: Módulo de alarma .....	48
Figura 38: Capa <i>Top</i> de la <i>PCB</i> .....	50
Figura 39: Capa <i>Bottom</i> de la <i>PCB</i> .....	50

### Índice de Tablas

Tabla 1: Calendario semanal del plan de trabajo.....	14
Tabla 2: Planificación secuencial del proyecto .....	15
Tabla 3: Diagrama de <i>Gantt</i> .....	17
Tabla 4: Tipos y comparativa de galgas .....	24
Tabla 5: Características de la galga elegida .....	25
Tabla 6: Valores límite de deformación.....	27
Tabla 7: Valores ganancia del amplificador .....	39
Tabla 8: Valoración económica .....	52



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

En esta memoria se describe la realización del Proyecto Final de Carrera para elaborar el **Diseño de un sistema de evaluación de la integridad estructural**. [1]

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un circuito que sea capaz de detectar cualquier deformación producida en una viga de voladizo. Este tipo de viga (figura 1) se caracteriza por tener uno de sus extremos empotrado mientras que el otro se encuentra en suspensión. Luego, para detectar la deformación producida en la viga, utilizaremos unos sensores (galgas extensométricas), que adheridos a la estructura, puedan revelar dicha alteración. Estos transductores están compuestos por un hilo muy fino y distribuido en varios tramos en paralelo, como se puede observar en la figura 2, y se conectarán a un circuito electrónico que al modificarse enviará una señal de alarma activando un dispositivo. [2]

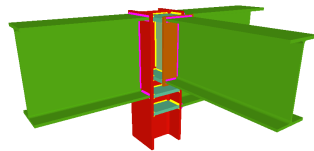


Figura 1: Ilustración de una viga voladizo

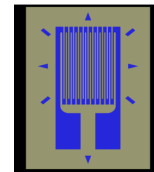


Figura 2: Esquema ilustrativo de una galga extensométrica

Para una mayor comprensión de los objetivos definidos anteriormente y de manera resumida se presenta a continuación el diseño del circuito

En la viga voladiza, se implementa un sensor (o sensores) para detectar una deformidad de la estructura. Este sensor (o sensores) va conectado a un circuito capaz de medir la deformidad de la viga por un aumento o disminución de la resistencia de la galga. Para poder usar la tensión de salida del circuito anterior, se utilizará un amplificador (o amplificadores si es necesario) para obtener unos valores adecuados para señalar una alarma en caso necesario. Esta alarma se accionará por medio de una señal analógica o señal digital.

El programa contempla las herramientas necesarias para la planificación y programación de las actividades que se deben realizar para la proyección del trabajo. El objetivo del programa de trabajo es convertirse en una guía útil para que facilite la mayor y más eficaz gestión del proyecto.

Con el fin de facilitar la consulta de las actuaciones y así permitir una mejor planificación, se describen los instrumentos y actuaciones diseñadas para la consecución de los objetivos definidos.

En primer lugar se presenta los **objetivos** que se quieren alcanzar para la realización de la actividad a realizar, ya que de esta forma podremos realizar una buena planificación y una adecuada evaluación del trabajo y poder cumplir en un periodo razonable el trabajo propuesto.

A continuación, se planteará la **estructura** de la propuesta con la intención de mejorar la planificación del Plan de Trabajo, clasificando las actividades a realizar e indicando el número de páginas de cada capítulo.

Seguidamente, se describirá la planificación de las diferentes **tareas**, así como las **actividades** programadas para la ejecución del proyecto.

Posteriormente, se establecerá un **calendario de trabajo** para hacer un seguimiento de las tareas que se deben realizar y presentar la documentación realizada hasta ese momento.

Importante es la realización de los **hitos** de trabajo para determinar el calendario de actividades. Circunscribir el cronograma de nuestro plan nos permitirá tener en contexto los puntos más relevantes que pueden afectar nuestro plan. El diagrama de *Gantt* nos permitirá identificar la actividad que se estará utilizando en cada uno de los recursos y la duración de esa utilización, de tal modo que puedan evitarse periodos ociosos innecesarios.

Para finalizar, se indicará los **riesgos e incidencias** que se pueden establecer en el proyecto (cuya solución es el plan de contingencia) y la **bibliografía** que se ha utilizado como fuente de información para la realización del trabajo.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo que se quiere conseguir en la realización del presente proyecto es obtener un sistema de medida de la integridad estructural. Para ello, hay que obtener de manera ordenada y consecutiva los siguientes objetivos parciales o instrumentales:

1. Estudio del funcionamiento y selección de galgas extensométricas
2. Diseño del circuito de medida de deformaciones
3. Diseño de la etapa amplificadora
4. Diseño del circuito discriminador
5. Diseño del módulo de alarmas
6. Diseño del layout de la placa del circuito

## 1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

En el siguiente diagrama de bloques, se detallan los pasos a seguir para el diseño del sistema de evaluación de la integridad estructural.

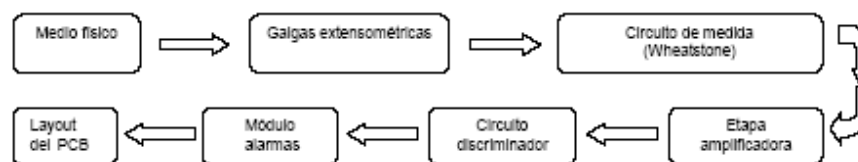


Figura 3: Diagrama de bloque funcional

Las distintas cargas que se generan sobre una viga voladizo pueden llegar a producir flexión en la barra y a la vez deformarse. Para poder llevar un control sobre el estado de la viga, se utilizará un sensor (figura 4) que se instalará en la superficie de la parte estructural. La galga extensométrica (sensor) está compuesta por una resistencia con una longitud dada cuando está en reposo y que cuando se ejerce una tensión sobre ella, aumenta la longitud de la resistencia (figura 5). El funcionamiento y selección de las galgas extensométricas será el contenido del objetivo 1 del apartado 1.2.

Para poder medir la variación de la resistencia, será necesario del uso de un circuito que diera variaciones a tan pequeñas desviaciones. Este circuito es el puente de *Wheatstone* (Figura 6). El diseño de este circuito abarcará el objetivo 2 del apartado 1.2. [3]

La señal de salida del puente es tan pequeña que solo podrá ser usada si previamente es acondicionada. Para tal fin, se utiliza un amplificador (operacional y/o de instrumentación) para conseguir acondicionar la señal y obtener valores de tensión manejables. El diseño de la etapa amplificadora será el objetivo 3 del apartado 1.2.

Para detectar la deformación producida en la viga, se necesitará diseñar un circuito discriminador para el módulo de alarma. Este circuito se puede implementar de forma analógica o digital. Si se elige la señal analógica, se diseñará el circuito apropiado para mandar la señal al módulo de alarma ya que la señal procedente del amplificador es analógica. Si se quiere implementar el circuito de forma digital, se necesitará un convertidor analógico/digital que convierta el voltaje a su forma digital equivalente y un microprocesador con su algoritmo correspondiente. El contenido de este diseño cumplirá el objetivo 4 del apartado 1.2.

Una vez recibida la señal (analógica o digital) el módulo de alarma se encargará de emitir la alarma correspondiente dependiendo del estado en que se encuentre la estructura. El diseño de este circuito englobará el objetivo 5 del apartado 1.2.

Por último, después de haber realizado el diseño del circuito de forma esquemática y verificar su funcionamiento, se procederá a implantar cada componente en una placa electrónica. Para ello, se ejecutará el layout del circuito electrónico para su posterior fabricación. La realización de este contenido será el objetivo 6 del apartado 1.2.

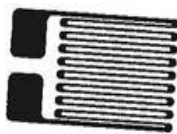


Figura 4: Galga extensométrica

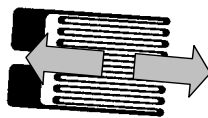


Figura 5: Galga aumentando de longitud

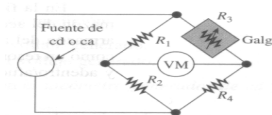


Figura 6: Puente de Wheatstone

### 1.3 TAREAS, PLANIFICACIÓN, HITOS

A continuación, se indica una descripción de las tareas y actividades en que se repartirá el trabajo.

### 1.3.1 Tareas y actividades

Las tareas y actividades son las siguientes:

#### 1 Definición del proyecto

- 1.1. *Obtener la documentación inicial.* Descarga de la información ofrecida por el consultor y otros existentes en la biblioteca.
- 1.2. *Leer enunciado.* Leer el enunciado junto con la documentación.

#### 2. Plan de trabajo (PEC1)

- 2.1. *Obtener la documentación.* Búsqueda y descarga de información.
- 2.2. *Leer documentación.* Estructurar y esquematizar la documentación leída (otras memorias, otros planes de proyecto, documentos de estilo, documentos aportados por el consultor...).
- 2.3. *Buscar bibliografía.* Búsqueda de bibliografía útil para el proyecto a medio plazo: sitios web, libros, documentos...
- 2.4. *Redactar índice del borrador.* Primero, redactar el índice para tener claros los puntos a incluir en el documento.
- 2.5. *Redactar borrador.* Descripción, objetivos, actividades, tareas, hitos, estructura del TFC, posibles incidencias y soluciones...
- 2.6. *Planificar tareas.* Establecer los hitos del proyecto así como los contenidos de la PEC2 y PEC3. Establecer el calendario de trabajo. Teniendo en cuenta los posibles riesgos, se debe temporizar las tareas proporcionalmente al esfuerzo.
- 2.7. *Acabar borrador.* Acabar el borrador y entregarlo. Repasar ortografía, añadir bibliografía y enviar. Quedar a la espera de recibir correcciones por parte del consultor.
- 2.8. *Corregir borrador.* Descargar correcciones y aplicarlas. Completar el contenido del borrador si es necesario.
- 2.9. *Entregar Plan de Proyecto.* Este será el Plan de proyecto definitivo, que coincide con la PEC1.

#### 3. Funcionamiento y selección de galgas extensométricas

- 3.1. *Recoger documentación.* Búsqueda de documentación adicional.
- 3.2. *Estudiar las galgas extensométricas.* Indicar qué son, funcionamiento y configuraciones más utilizadas.
- 3.3. *Elección del modelo de galga.* Se elegirá la galga más apropiada, la cantidad y la configuración de la misma.
- 3.4. *Redactar la documentación.* Redactar la documentación asociada a la tarea repasando semántica y ortografía.[4]

#### 4. Diseño del circuito de medida de deformaciones

- 4.1. *Búsqueda de documentación.* Búsqueda de la documentación necesaria para el diseño del circuito

- 4.2. *Estudio del puente de Wheatstone.* Estudio del puente de *Wheatstone*, tipos de montaje, tensión a aplicar, conexionado.[5]

## 5. Diseño de la etapa amplificadora

- 5.1. *Recopilación de documentación.* Búsqueda de documentación para el diseño de la etapa amplificadora.
- 5.2. *Estudio del tratamiento de la señal.* Estudio de amplificadores operacionales y de instrumentación, acondicionamiento de la señal.
- 5.3. *Escoger programa diseño de circuitos eléctricos.* Búsqueda y descarga del programa *TINA-I* de *Texas Instruments*, estudiar dicho programa y hacer pruebas.

## 6. Diseño del circuito discriminador

- 6.1. *Búsqueda información circuito discriminador.* Estudio para la realización del diseño de un circuito discriminador, elegir opción circuito analógico o digital, diseño circuito o implementación de algoritmo, estudio de microprocesadores y elección del apropiado si es el caso.

## 7. Diseño del módulo de alarmas

- 7.1. *Diseño circuito emisión alarmas.* Estudio para diseño de un módulo encargado de emitir alarmas en un estado de aceptable o peligroso.

## 8. Diseño del layout de la placa del circuito

- 8.1. *En qué consiste el diseño del layout.* Estudio en qué consiste dicho diseño, integración de los diferentes elementos diseñados, reflexionar y simplificar el método más apropiado

## 9. Conclusiones y ampliaciones

- 9.1. *Reflexión sobre objetivos cumplidos.* Se concluirá anotando los problemas surgidos en el desarrollo del proyecto, lecciones aprendidas y soluciones aportadas.

## 10. Confeccionar presentación

- 10.1. *Escoger contenidos.* Seleccionar contenidos de la memoria a incluir. Tener en cuenta diagramas, esquemas u objetivos similares que ayuden a la comprensión del proyecto.
- 10.2. *Redactar presentación.* Uso de *PowerPoint* en la misma. Repaso semántico, sintáctico y ortográfico.

## 11. Debate virtual

- 11.1. *Contestar preguntas.* Permanecer a la espera de las preguntas del tribunal. Contestar lo mejor y más rápido posible.

### 1.3.2 Calendario de trabajo

Teniendo en cuenta la evaluación continua de otras asignaturas, la conciliación familiar y el trabajo profesional, está previsto dedicar al proyecto el tiempo siguiente:

- De lunes a viernes: 2 horas al día.
- Sábados: 3 horas
- Domingos: 3 horas (festivos: 3 horas)

Esto implica dedicar 16 horas de media a la semana. Se identificarán las semanas con un número:

- “Semana 1” semana que comienza en el día 2 de marzo
- “Semana 2” semana que comienza en el día 7 de marzo
- “Semana 3” semana que comienza en el día 14 de marzo
- Etc.

Se indican a continuación las horas que se piensa dedicar al proyecto. Se han incluido las vacaciones, aunque dependiendo del trabajo podría aumentarse las horas de dedicación, lo que facilitaría el cumplimiento de la planificación.

Inicio Semana	Semana	Horas	Días Festivos o Vacaciones
02-mar	1	12	
07-mar	2	16	
14-mar	3	16	
21-mar	4	16	
28-mar	5	26	
04-abr	6	22	
11-abr	7	10	Fin de Semana de Vacaciones
18-abr	8	4	Del Miércoles al Domingo de Vacaciones
25-abr	9	0	Enfermedad familiar
02-may	10	0	Enfermedad familiar
09-may	11	0	Enfermedad familiar
16-may	12	55	
23-may	13	34	
30-may	14	46	
06-jun	15	12	
		<b>269</b>	<b>Total horas Aprox.</b>

Tabla 1: Calendario semanal del plan de trabajo

Se comienza a partir del inicio del proyecto. Se marca en verde las semanas que han pasado.

### 1.3.3 Planificación

Se ha realizado una planificación detallada del proyecto. Para ello, se ha diseñado una tabla ( tabla 2) donde se ha incluido el número de la tarea, su descripción, las actividades que contiene, el coste en horas y la fecha de inicio y de fin con el propósito de conseguir los objetivos deseados.

El plan de trabajo divide el proyecto en una secuencia ordenada de tareas estableciendo una dependencia descendiente entre ellas, es decir, cada inicio de tarea depende de la finalización de la tarea anterior.

La secuencia de las tareas se ha plasmado en la tabla 3, en el que se ha fijado sus fechas de inicio y fin. Estas fechas han sido extraídas del diagrama de *Gantt* que se detalla en el punto 5.4.1.

Tarea	Nombre	Actividades	Horas	F. Inic.	F. Fin
1	Definición del proyecto	Obtener la documentación inicial Leer enunciado	2 2	02-mar 03-mar	02-mar 03-mar
2	Plan de trabajo (PEC1)	Obtener la documentación Leer documentación Buscar bibliografía Redactar índice borrador Redactar borrador Planificar tareas Acabar borrador Corregir borrador Entregar Plan de proyecto	2 3 3 4 2 2 5 7 0	04-mar 05-mar 06-mar 07-mar 09-mar 10-mar 11-mar 13-mar 15-mar	04-mar 05-mar 06-mar 08-mar 09-mar 10-mar 12-mar 15-mar 15-mar
3	Estudio del funcionamiento y selección de galgas extensométricas (PEC2)	Obtener documentación Leer documentación Elección de la galga más apropiada y redactar documento de elección.	4 5 5	16-mar 18-mar 20-mar	17-mar 19-mar 21-mar
4	Diseño del circuito de medida de deformaciones (PEC2)	Búsqueda de información necesaria. Leer documentación Estudio del puente de <i>Wheatstone</i> , tipos de montaje, tensión a aplicar, conexionado.	4 4 8	22-mar 24-mar 26-mar	23-mar 25-mar 28-mar
5	Diseño de la etapa amplificadora (PEC2)	Búsqueda documentación diseño etapa amplificadora. Estudio de amplificadores operacionales y de instrumentación. Diseño etapa amplificadora Búsqueda y descarga programa <i>TINA-I</i> , estudio del programa y hacer pruebas. Realizar borrador PEC2 y entrega. Una vez recibido borrador, corregir	6 8 10 10 4	29-mar 31-mar 02-abr 04-abr 06-abr	30-mar 01-abr 03-abr 05-abr 07-abr

		PEC2 y entrega de la misma.	12	08-abr	12-abr
6	Diseño del circuito discriminador (PEC3)	Estudio diseño circuito discriminador para elegir si el diseño será analógico o digital. Leer documentación Diseño circuito Diseño circuito	6 4 15	13-abr 18-abr 16-may	15-abr 19-abr 18-may
7	Diseño del módulo de alarmas (PEC3)	Buscar información módulo alarmas. Leer documentación Diseño módulo alarmas.	4 4 14	19-may 19-may 19-may	19-may 19-may 21-may
8	Diseño del layout de la placa del circuito (PEC3)	Estudio en qué consiste dicho diseño, integración de los diferentes elementos diseñados, reflexionar y simplificar el método más apropiado.	12	21-may	22-may
9	Conclusiones y ampliaciones (PEC3)	Se concluirá anotando los problemas surgidos en el desarrollo del proyecto, lecciones aprendidas y soluciones aportadas. Realizar borrador PEC3 y entrega. Una vez recibido borrador, corregir PEC3 y entrega de la misma.	4 6 12	22-may 22-may 23-may	22-may 23-may 24-may
10	Confeccionar memoria	Redactar líneas futuras trabajo Integrar en memoria Redactar conclusiones Redactar capítulos formales Hacer repaso semántico Hacer repaso sintáctico Hacer repaso ortográfico Terminar redactar memoria	2 2 2 1 1 1 1 28	25-may 26-may 27-may 28-may 28-may 28-may 28-may 29-may	25-may 26-may 27-may 28-may 28-may 28-may 28-may 03-jun
11	Confección presentación	Escoger contenidos Redactar Presentación	4 16	03-jun 04-jun	03-jun 05-jun
	Entrega Memoria	Correcciones Memoria Entrega Memoria	18 0	5-jun 6-jun	6-jun 6-jun
12	Debate virtual	Contestar preguntas	6	27-jun	29-jun

Tabla 2: Planificación secuencial del proyecto

En la planificación del proyecto, se estableció los hitos y los contenidos para la realización de la memoria. Se calculó unos tiempos, que en principio se esperaba que eran suficientes para la realización del proyecto. Una vez terminado el trabajo final de carrera, se puede comprobar que se ha aumentado las horas de trabajo y que ha habido algunas semanas que no se ha podido seguir realizando el proyecto, como se puede observar en la tabla 1. Esto ha sido debido a que se ha producido una hospitalización de un familiar directo ocasionando un retraso considerable en la realización del proyecto.

Además, días antes de la entrega de la PEC3, la estación de trabajo por la cual se estaba realizando el trabajo se deterioró, lo que provocó acogerme al plan de contingencia del subapartado 1.5.5.1 de este capítulo. El PC conseguido es de unas características inferiores al que usaba normalmente, por lo que me ha provocado algunos retrasos en la utilización de algunos programas, ya que o iban demasiado lentos o el ordenador se quedaba colgado.

Todo ello, me ha ocasionado que tanto la realización de la PEC3, la memoria y la presentación virtual se realizara en muy poco tiempo provocando un estado de ánimo anómalo



en mi persona. Aún así, una vez terminados los trabajos, creo que se ha cumplido los objetivos, aunque quizás de una manera diferente.

### 1.3.3.1 Diagrama de Gantt

A continuación se muestran el diagrama de Gantt para modelar la planificación de las tareas necesarias para la realización del proyecto. El diagrama se ha realizado con el *Project* donde se ha incluido las tareas e hitos para la consecución del trabajo.

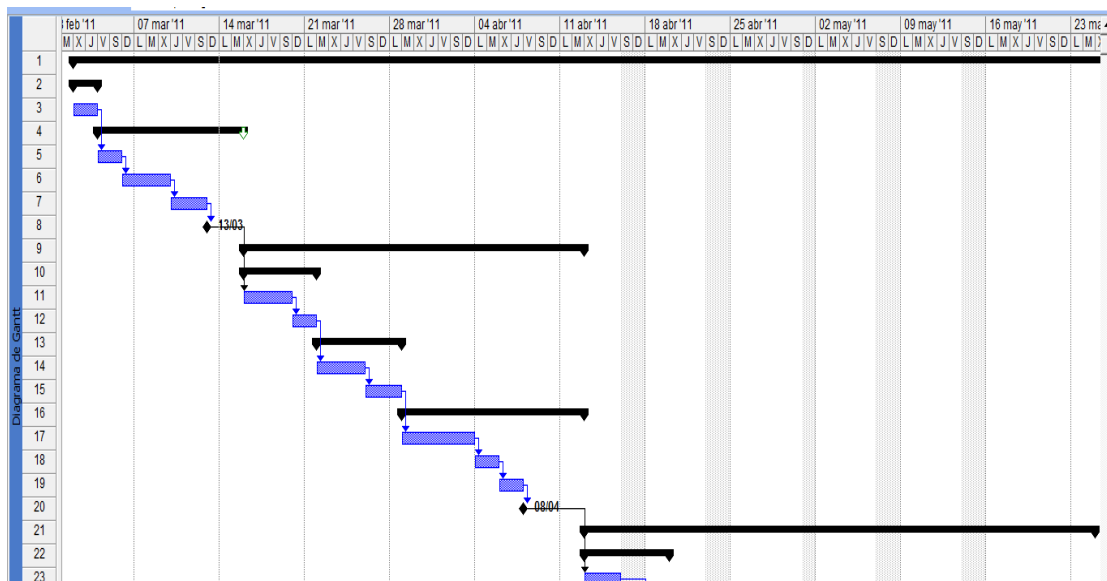


Tabla 3: Diagrama de Gantt

## 1.4 MATERIAL

Se indica a continuación el material necesario para llevar a cabo el proyecto.

### Software:

- *MSOffice, en particular Word, Excel y PowerPoint.* Se utilizarán para describir el proyecto e insertar las tablas necesarias para la compresión del mismo.
- *MS Project.* Es una aplicación de gestión de proyectos y se utilizará para elaborar la planificación y asignar las tareas necesarias para el seguimiento del proyecto mediante el diagrama de Gantt.
- *TINA-I de Texas Instruments.* Es un programa que se utiliza para simular circuitos analógicos. Su utilización en el proyecto será diseñar el circuito necesario para el trabajo y simular su funcionamiento.
- *Eagle de CadSoft.* Es un software dedicado al desarrollo de circuitos impresos.

- Acrobat Reader. Software para visualizar documentos en PDF
- Windows XP o Vista. Sistema operativo utilizado

**Hardware:**

- Punto de trabajo estándar de la UOC

**1.5 INCIDENCIAS, RIESGOS Y PLAN DE CONTINGENCIA**

Se indican a continuación los riesgos e incidencias que se pueden producir a lo largo del proyecto. A continuación se indica la solución que se llevará a cabo en caso de producirse.

**1.5.1 Avería de la estación de trabajo**

Podría ocurrir que la estación de trabajo sufriera algún tipo de percance.

**1.5.1.1 Plan de contingencia**

- Se intentará conseguir otro PC rápidamente.
- Caso de que afectara al uso de licencia (licencia gastada por PC estropeado) se pedirá consejo al consultor sobre el software alternativo de disponibilidad rápida.
- Se efectuarán copias de seguridad diarias del trabajo realizado en una cuenta personal de *Gmail* o *Hotmail*.

**1.5.2 Solapamiento de la entrega de alguna PEC con entregas de otras asignaturas**

Puede coincidir la entrega de más de una PEC de asignaturas distintas, ocasionando falta de tiempo para acabar la entrega del trabajo

**1.5.2.1 Plan de contingencia**

- Si es necesario, se pedirá algún día extra de vacaciones para poder llegar a tiempo.
- Se intentará aportar más horas al Proyecto

**1.5.3 Vacaciones**

En este semestre, hay varios días vacaciones. Puede darse la situación de quedarse descolgada la asignatura.

**1.5.3.1 Plan de contingencia**

- Se cogerán menos días de vacaciones
- Se trabajará en el proyecto, si fuera necesario, en vacaciones.

## 1.7 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Para la realización del presente proyecto, se debe realizar un estudio de los distintos elementos que se necesitan para el funcionamiento del circuito que se propone. Para ello, se ha dividido el trabajo en capítulos para exponer como funciona cada parte del circuito. La distribución de estos capítulos se divide de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se hará un **estudio de las galgas extensométricas**, se explicará que es una galga, como funciona y se seleccionará un modelo según el estudio realizado.

En el capítulo 3 se buscará un **diseño de medida de deformaciones** para el circuito, se determinará los tipos de montaje existentes y se elegirá el circuito más apropiado para la lectura de las galgas extensométricas.

En el capítulo 4 se expondrá un **diseño de amplificación**, para ello se hará un estudio de los distintos tipos de amplificadores que existen, su funcionamiento y se decidirá por el más apropiado para amplificar la señal proveniente del circuito de medida. Además, se realizará pruebas en un simulador de circuitos electrónicos para comprobar la elección y funcionamiento del mismo.

En el capítulo 5 se buscará información sobre diseños de circuitos analógicos y digitales, se elegirá si la tensión del amplificador se tratará de forma analógica o digital, dependiendo de la elección del circuito y se elegirá un **circuito discriminador** apropiado para el trabajo.

En el capítulo 6 se diseñará un **módulo de alarmas** que emitirá una señal según si la galga detecta alguna deformación en la estructura, para ello nos indicará si la viga se encuentra en un estado aceptable o peligroso.

En el capítulo 7 se **diseñará el layout** de la placa del circuito electrónico estudiado y seleccionado y así simplificar el método más apropiado.

En el capítulo 8 se calculará **el coste** del proyecto. Se hará una estimación del valor de cada elemento y el importe final.

En el capítulo 9 se realizará un comentario donde contendrá **las conclusiones**. En él se hará una observación sobre los objetivos cumplidos del trabajo y las lecciones aprendidas para futuros proyectos

## CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Las cargas que se generan sobre la viga voladizo pueden llegar a producir flexión en la barra y deformarse. Para controlar el estado de esta estructura, se utilizará un sensor apropiado para que nos mande una señal y controlar si existe deformación, este sensor es la galga extensométrica. Para ello, y guiándonos por el diagrama de bloques de la figura 3, se estudiará el funcionamiento de este transductor y se seleccionará el más apropiado.

### 2.1 DESCRIPCIÓN

Una galga extensométrica es un sensor formado por un hilo muy fino y distribuido en varios tramos en paralelo (figura 7). Su funcionamiento se basa en el cambio de su resistencia eléctrica cuando varía su longitud. Luego, una galga es una resistencia capaz de detectar variaciones longitudinales muy pequeñas [6].

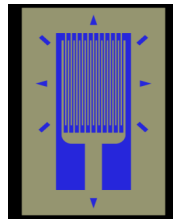


Figura 7: Ilustración galga extensométrica

Las galgas son transductores pasivos, esto quiere decir que necesitan una fuente de energía eléctrica para medir las variaciones, que aplicados sobre un material, permiten evaluar la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. Así, fuerzas de compresión, tracción o torsión aplicadas sobre la viga, generan deformaciones que son transmitidas a la galga, respondiendo ésta con una variación a su propia resistencia eléctrica.

La unidad de medida de la galga es el  $\varepsilon$  (épsilon) y expresa la deformación producida en un material. Es una medida adimensional y enuncia la relación que existe entre el incremento de la longitud medida y la longitud inicial. [7]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.1)$$

### 2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Si a un hilo conductor se le somete una fuerza en sus extremos (figura 8), éste se alarga, aumentando su longitud ( $L$ ). A medida que su longitud aumenta, la sección transversal del hilo disminuye, variando su resistencia eléctrica (ecuación 2.2). Entonces, el

funcionamiento de la galga se basa en el cambio de resistencia del hilo cuando varía su longitud. Como la galga está adherida al material que se quiere evaluar, si el material se deforma -alargándose o contrayéndose- el sensor sufre la misma deformación. En definitiva, hay una variación directa entre la deformación de la galga y la variación de la resistencia.

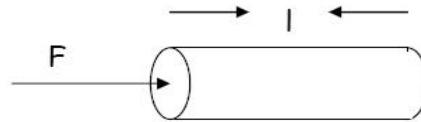


Figura 8: Cambio de longitud de un hilo conductor

La galga extensométrica se deforma (figura 9) cuando es sometido a una fuerza, de la misma manera que un hilo conductor, variando su resistencia inicial ya que está constituida por un hilo metálico muy largo distribuido en varios tramos paralelos.

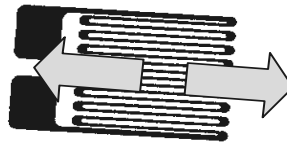


Figura 9: Deformación de una galga

La resistencia de un conductor viene condicionada por la expresión [8]:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.2)$$

donde:

$R$  = resistencia  
 $\rho$  = resistividad  
 $L$  = longitud  
 $S$  = sección transversal

Esto supone que cualquier cambio en la longitud, en la sección o en la resistividad provocará cambios en la resistencia.

Las galgas extensométricas son básicamente sensores resistivos y como todo elemento resistivo su resistencia viene dada por la expresión 2.2. Concretamente, las galgas extensométricas son resistencias variables por la deformación donde su ecuación básica es [9]:

$$R_g = R_0 (1 + K * \epsilon) \quad (2.3)$$

donde:

$R_g$  = resistencia de la galga deformada  
 $R_0$  = resistencia nominal de la galga o en reposo  
 $K$  = cte. de galga (normalmente vale 2 para galgas con rejillas)

$\varepsilon = \text{deformación por unidad de longitud (dL/L)}$

Pero las galgas, en general, se utilizan para medir una deformación asociada a un esfuerzo mecánico, donde la ley de *Hooke* [10] establece que la tensión mecánica vale:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon \quad (2.4)$$

$E = \text{Constante del material o módulo de Young}$

$\sigma = \text{Tensión mecánica o esfuerzo}$

$\varepsilon = \text{deformación unitaria de longitud}$

Combinando las dos ecuaciones 2.3 y 2.4 se establece que la resistencia de galga es:

$$R_g = R_0 \left( 1 + \frac{K}{E} \sigma \right) \quad (2.5)$$

Una parte a considerar es el límite elástico que puede soportar una galga al ser sometido una fuerza, ya que, si supera este límite puede llegar a la rotura del sensor.

En la figura 10 se puede observar, aplicando la fórmula 2.4, que la deformación unitaria es proporcional al esfuerzo transmitido (Ley de *Hooke*).

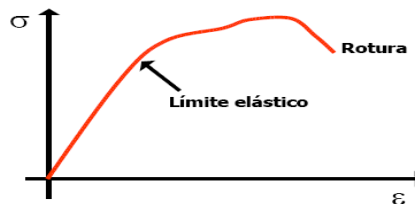


Figura 10: Diagrama de tensión deformación de una galga

## 2.3 LIMITACIONES

Los factores que hay que tener en cuenta para el uso correcto de las galgas son [11]:

- El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera de su límite elástico de deformaciones (4% de la longitud de la galga), es decir, no se debe salir de la zona de funcionamiento ya que tendríamos una lectura errónea.
- El esfuerzo debe ser transmitido íntegramente en la galga. La deformación de la galga debe ser la de la pieza, es decir, el sensor debe estar perfectamente adherida.
- Hay que tener en cuenta la sensibilidad transversal, es decir, la galga debe colocarse en la dirección adecuada ya que se puede tener valores de medida indeseables.

- La temperatura influye directamente sobre la galga. Para compensar sus efectos se puede utilizar galgas pasivas o autocompensadas.
- La unión de materiales distintos pueden generar pequeñas diferencias de potencial, para ello, la galga debe estar totalmente aislada.
- Tener en cuenta el calentamiento de la galga por la disipación de su potencia.

## 2.4 TIPOS DE GALGAS

Como se ha comentado en el apartado 2.1, una galga es una resistencia que se deforma longitudinalmente en una dirección cuando sobre ella se le ejerce una fuerza.

Según el tipo de material con que estén contruidos, las galgas que nos podemos encontrar en el mercado son los siguientes [12]:

- **Metálica** o de hilo conductor (figura 11). Está constituido por un hilo delgado y muy fino, soportado sobre un material no conductor y termina en dos terminales para su posterior conexión.
- **Semiconductor** (figura 12). Constituido por un material semiconductor y soportado sobre un material aislante. Se basa en el efecto piezorresistivo que genera una variación de la conductividad según la fuerza aplicada.

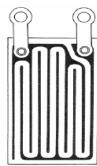


Figura 11: Galga metálica

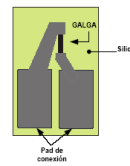


Figura 12: Galga semiconductor

## 2.5 CARACTERÍSTICAS

Las principales características de la galga son las siguientes [13]:

- **Anchura y longitud**: Nos permite escoger el tamaño del sensor.
- **Peso**: Nos define el peso de la galga y suele ser en gramos.
- **Tensión**: Viene expresado en tanto por ciento con respecto a la longitud de la galga y nos proporciona la variación de la galga cuando se deforma.
- **Temperatura**: Rango de temperatura de trabajo.
- **Resistencia**: Resistencia que ofrece la galga en reposo.
- **Factor de galga**: Nos determina la sensibilidad de la galga sobre la constante K. Su valor viene expresado por la fórmula:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2.6)$$

- **Coefficiente de temperatura**: Variación porcentual del valor nominal de la galga con respecto al incremento de temperatura.
- **Prueba de fatiga**: Nos indica el número de contracciones que soporta la galga sin deteriorarse y se mide en ciclos.

- Material de la lámina: Tipo de material del que está construido la lámina conductora o el semiconductor.
- Material de la base: Tipo de material del que está construida la base.
- Factor de expansión lineal: Error de la galga en reposo y depende de la temperatura.

## 2.6 COMPARATIVA

A continuación, se detalla en la tabla siguiente (tabla 4), una comparación entre los dos tipos de galgas más utilizadas, manejando las características más significativas.

	Metálica	Semiconductor
<b>Factor de galga</b>	2	50-60
<b>Resistencia</b>	120,350,600,1000Ω	Más de 500Ω
<b>Linealidad</b>	± 0.1% hasta 1000μϵ y 1% hasta 10000μϵ	±1% hasta 1000μϵ
<b>Tensión de ruptura</b>	25000μϵ	5000μϵ
<b>Fatiga</b>	10 <sup>7</sup> ciclos	10 <sup>6</sup> ciclos
<b>Efecto temperatura</b>	Medio	Alto

Tabla 4: Tipos y comparativa de galgas

Como podemos observar en la tabla, las galgas metálicas o de hilo y lámina, presenta un factor de galga y unos valores de resistencia pequeños, por lo que se verán influidas por las resistencias de los hilos. Sin embargo, son las que presentan mejores valores de linealidad, tensión de ruptura y fatiga. La influencia de temperatura presenta un efecto moderado.

Las semiconductoras son las que presentan mejor factor de galga, no obstante, son muy sensibles a la temperatura.

## 2.7 ELECCIÓN DE GALGA

Para la elección de la galga, se ha tomado en cuenta algunos factores necesarios para que el funcionamiento sea el deseado.

En primer lugar, se ha tenido en cuenta las conclusiones expuestas en el apartado 2.6, donde se han marcado con distintos colores los valores más aceptables y los menos deseables, eligiendo la galga metálica como el sensor más apropiado para detectar alguna posible deformación en la viga voladiza.



Una vez seleccionada el tipo de galga, se ha buscado un modelo adecuado acorde a las características descritas en el apartado 2.5 y no contempladas en el apartado 2.6 de este mismo punto.

Por último, se ha desechado las galgas que no cumplen las limitaciones expuestas en el apartado 2.4, seleccionando el sensor (figura 13) cuyas características se exponen a continuación [14]:

**Código RS 308-118**

**Fabricante RS**

**Referencia del Fabricante N11FA812023**

**Precio unidad 5,80€**

**Los detalles de la galga extensométricas son:** Galgas Extensométricas Laminares con Placas Terminales Autoadhesivas.

*“Galgas extensométricas de lámina para uso general, con soporte de poliéster. Disponibles con compensación de temperatura para acero (tipo 11) o aluminio (tipo 23). Cada galga lleva incorporados cables de conexión de 30mm. Se suministra con dos placas terminales autoadhesivas, para facilitar su conexión a la galga sin riesgo de dañarla por aplicar excesivo calor o tensión mecánica al conectar los cables de medida al dispositivo” [15].*

Longitud de la galga	8mm
Tensión medible	del 3 al 4% máx.
Temperatura de funcionamiento	de -30°C a +80°C
Resistencia de la galga	120Ω ±0,5%
Factor de galga	2,1 ±1% (coef. de temp. <5%/100°C)
Prueba de fatiga	>10 <sup>6</sup> contracciones con tensión de 1.000μ
Material de la lámina	Aleación de cobre -níquel
Material de la base	Poliéster
Tipo 23 de aluminio	23,4x10 <sup>-5</sup> /°C
Color del soporte	Tipo 23 Azul

Tabla 5: Características de la galga elegida

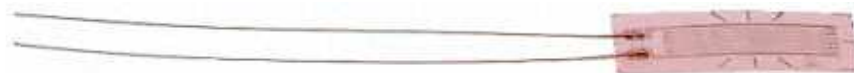


Figura 13: Galga extensométricas seleccionada

La deformación de la galga viene determinada por la ley de *Hooke*, como se ha comentado en el apartado 2.2, luego aplicando la expresión 2.1 tenemos:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{8mm \cdot 4\%}{8mm} = 0,04 \quad (2.7)$$

Obtenemos la deformación máxima que puede soportar el transductor. Si consideramos las resistencias en reposo, se puede calcular la variación de la resistencia con respecto a la deformación:

$$\Delta R = K \cdot R_0 \cdot \varepsilon = 2,1 \cdot 120 \cdot 0,04 = 10,08 \Omega \quad (2.8)$$

Ofreciendo la resistencia un valor máximo de 130,8  $\Omega$ .

Este resultado determina la deformación máxima que debe alcanzar la galga extensométrica, ya que se corre el riesgo de llegar a la rotura de la misma como se puede observar en la figura 10.

Para verificar que la elección de la galga ha sido la adecuada, se debe comprobar sobre qué valores se puede determinar la deformación de la viga, ya que estos datos de deformación tienen que estar incluidos en los valores de la galga extensométrica que se han detallado en la tabla 5. Para ello, se debe determinar las deformaciones unitarias de las estructuras de hormigón y las de acero.

El límite elástico para cualquier tipo de acero (figura 14) se corresponde a una deformación remanente del 0,2 por 100. Luego, la deformación límite elástico del acero es 0,002. Se tomará este valor como límite de seguridad para la deformación del mismo.

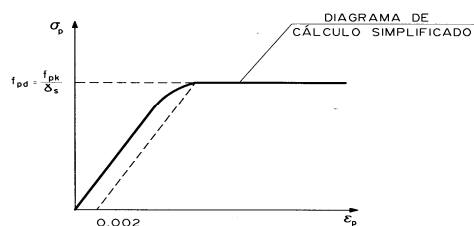


Figura 14: Diagrama tensión-deformación del acero

La deformación de rotura del hormigón a compresión es de 0,002 y de flexión de 0,0035 (figura 15). Los hormigones con mayor resistencia obtienen deformaciones unitarias de 0,002 y 0,0025, los de baja resistencia logran valores de 0,0035 y los de mediana 0,003. Se tomará como límite de seguridad para la deformación del acero 0,002 [16].

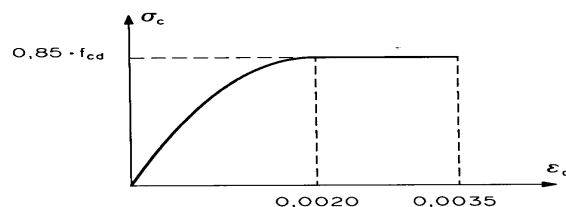


Figura 15: Diagrama tensión-deformación del hormigón

Aunque estos valores dependen de la sección, longitud, carga, humedad, etc., de la estructura, se tomarán unos valores medios para facilitar los resultados. Además, se tendrá en cuenta la fase elástica (deformaciones elásticas recuperables) y la fase plástica (deformaciones elásticas no recuperables) para tomar el valor de deformación (Figura 16).

Por lo tanto, cómo las deformaciones del acero y del hormigón son similares, aunque dependen en gran medida de varios factores, se tomará como deformación unitaria definitiva el valor límite de 0,002, ya que este valor de deformación nos sirve de referencia tanto para la estructura de acero como la de hormigón. [16]

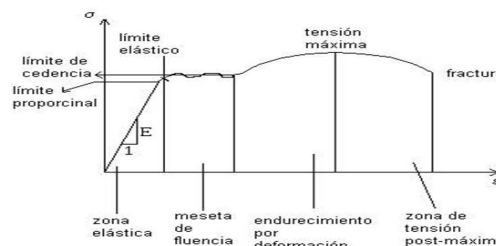


Figura 16: Diagrama límites elásticos y tensiones máximas

Se tomarán las mediciones límites para determinar el estado de la viga de la siguiente manera:

	Valor de deformación ( $\epsilon$ )
<b>Estructura segura</b>	$0 \leq \epsilon \leq 0,001$
<b>Estructura aceptable</b>	$0,001 < \epsilon \leq 0,002$
<b>Estructura peligrosa</b>	$0,002 < \epsilon$

Tabla 6: Valores límite de deformación

De acuerdo con el apartado 1.2 del capítulo 1, donde se enumera los objetivos a cumplir para conseguir un sistema de medida de la integridad estructural, se puede confirmar que, después de haber estudiado el funcionamiento de una galga extensométrica, se ha seleccionado un tipo de transductor en concreto que será el encargado de dar unos valores dependiendo de la deformación de su resistencia, luego se puede confirmar que se ha cumplido el objetivo 1 del apartado 1.1 del capítulo 1.

Una vez obtenidos los rangos de los valores de deformación de la galga cuando la estructura se encuentra segura, aceptable o peligrosa, hay que diseñar un circuito donde, a partir del valor de sus resistencias, nos dé una tensión donde se pueda apreciar si la estructura se ha deformado o se encuentra en una situación segura. Este circuito de medida será el puente de *Wheatstone*.

## CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL CIRCUITO DE MEDIDA DE DEFORMACIONES.

Para detectar los cambios en la resistencia que se producen en las galgas, necesitamos un circuito, que sometido a una corriente eléctrica, nos de cómo resultado una medida que nos permita definir el estado de deformación de la galga. Para ello, el paso siguiente a estudiar, conforme a la figura 3 del capítulo 1, es el puente de *Wheatstone*.

### 3.1 PUENTE DE *WHEATSTONE*

Las galgas, al medir deformaciones pequeñas en relación al tamaño de la estructura, necesitan de un circuito capaz de obtener un valor de tensión apreciable que requiera una medida exacta a los cambios de resistencia. Este circuito es el puente de *Wheatstone* (figura 17), y es el montaje más habitual para obtener una señal eléctrica en función de la deformación de sensor. Este puente está formado por cuatro ramas, donde en cada una está instalada una resistencia de igual valor y si se produce una variación en una de ellas se traduce en una variación de tensión en la salida [13].

Según el circuito de la figura 17, la tensión de salida en  $V_0$  se calcula como:

$$V_{0+} = \frac{V_B}{R_1 + R_4} R_1 \quad (3.1)$$

$$V_{0-} = \frac{V_B}{R_2 + R_3} R_2 \quad (3.2)$$

La diferencia entre las dos tensiones 3.1 y 3.2, que es la tensión de salida en bornes de  $V_0$ , sería:

$$V_0 = V_{0+} - V_{0-} = \frac{V_B}{R_1 + R_4} R_1 - \frac{V_B}{R_2 + R_3} R_2 = V_B \left( \frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \quad (3.3)$$

para que el puente esté equilibrado, es decir, que  $V_0 = 0$ , se tiene que dar:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (3.4)$$

luego, si una de las resistencias de la ecuación 3.4 varía, se rompe el equilibrio, entonces  $V_0$  es distinta de cero ( $V_0 \neq 0$ ).

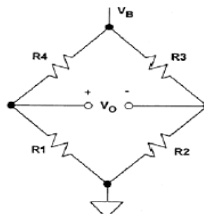


Figura 17: Esquema puente de *Wheatstone*

Para medir la deformación que se puede producir en la estructura a evaluar, el puente de *Wheatstone* se puede diseñar de tres maneras diferentes: con una, con dos y con cuatro galgas. Estos montajes se denominan como montaje en cuarto de puente, semipuente y puente completo respectivamente. Para ello, como se verá más adelante, hay que tener en cuenta un parámetro muy importante, ya que nos puede falsear la salida de tensión. Este parámetro es la temperatura, ya que una variación de ésta produce también una variación en la resistencia. [17].

### 3.1.1 Puente de medida con una galga.

El montaje con una galga en el puente de *Wheatstone* sería de la manera siguiente:

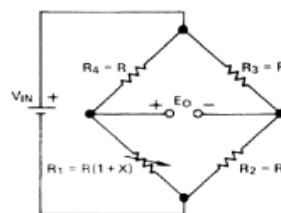


Figura 18: Puente de *Wheatstone* con una galga

Como se puede observar en la figura 18, todas las resistencias son iguales menos el valor de R1 (valor de la resistencia de la galga en reposo) que es variable por el factor (1+x), donde  $x = K \cdot \varepsilon$  o también  $x = \Delta R/R$ . El valor de la R1 es igual que los valores de las demás resistencias cuando no hay deformación en la galga, es decir, cuando el valor de  $x=0$ .

A continuación, la tensión de salida en bornes de  $E_o$ :

$$E_o = V_{in} \left( \frac{x}{2x + 4} \right) = \frac{V_{in}}{4} \left( \frac{x}{\frac{x}{2} + 1} \right) \quad (3.5)$$

Como se puede apreciar en la expresión 3.5, este circuito no presenta linealidad, es decir, la relación tensión de salida  $E_o$  y variación de la resistencia de la galga no son directamente proporcionales luego, no es lineal. Pero, a variaciones pequeñas de  $x$  puede ser lineal en algunos casos, es decir,

$$E_o \cong \frac{V_{in}}{4} x \quad \text{siempre que } x \ll 1 \quad (3.6)$$

El inconveniente de este circuito es que la galga nos puede falsear la tensión de salida a causa de un aumento o disminución de la temperatura, ya que las galgas son muy sensibles estos cambios.

La sensibilidad del puente se expresa de la manera siguiente:

$$S = \frac{V_{in}}{4R_0} \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Puente de medida con dos galgas

El montaje con dos galgas en el puente de *Wheatstone* esquemáticamente sería de la manera siguiente:

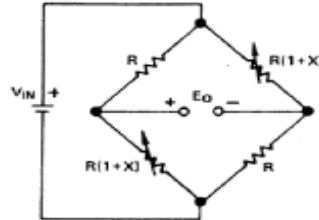


Figura 19: Puente de *Wheatstone* con dos galgas

En el circuito de la figura 19, las resistencias son iguales dos a dos, es decir,  $R_1=R_3$  y  $R_2=R_4$ . De la misma manera que en el apartado anterior, las resistencias  $R_1$  y  $R_3$  (valores de las resistencias de las galgas en reposo) son variables por el factor  $(1+x)$ , donde  $x = K \cdot \varepsilon$  o también  $x = \Delta R/R$ . Los valores de  $R_1$  y  $R_3$  son iguales que los valores de las resistencias  $R_2$  y  $R_4$  cuando no hay deformación en la galga, es decir, cuando el valor de  $x=0$ .

Cuando se le aplica una fuerza a la viga o esta se deforma, una de las galgas recibe una compresión mientras que la otra se extiende con la misma magnitud luego, en el puente obtendremos una salida del doble que si fuera con el puente de una galga. De la misma manera, si las dos galgas cambian con igual magnitud, en la salida del puente obtendremos un valor cero, luego presenta compensación por temperatura al cambiar de resistencia.

A continuación, se calcula el valor de la tensión de salida en bornes de  $E_0$  para este circuito:

$$E_0 = \frac{V_{in}}{2} \frac{x}{\left(\frac{x}{2} + 1\right)} \quad (3.8)$$

De la misma manera que en el punto 3.1.1, y como se puede apreciar en la expresión 3.6, este circuito no es lineal. Aun así, a variaciones pequeñas de  $x$  puede ser lineal en algunos casos si  $x \ll 1$ ,

$$E_0 \cong \frac{V_{in}}{2} x \quad \text{siempre que } x \ll 1$$

La ventaja que tiene el montaje de este circuito con respecto al anterior es que la sensibilidad se ha duplicado.

$$S = \frac{V_{in}}{2R_0} \quad (3.9)$$

### 3.1.3 Puente de medida con cuatro galgas

Cuando se sustituye las cuatro resistencias por cuatro galgas (figura 21), la tensión de salida en bornes de  $E_0$  sería:

$$E_0 = V_{in} x \quad (3.10)$$

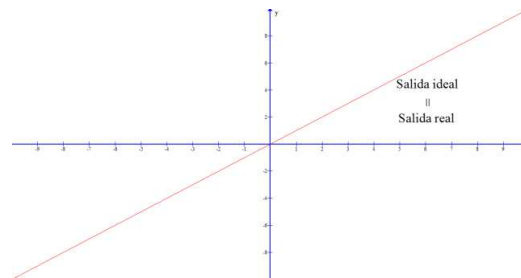


Figura 20: Linealidad del puente con cuatro galgas

De forma diferente que en los apartados 3.1.1 y 3.1.2, este circuito si es lineal, como se puede apreciar en la figura 20 y en la expresión 3.7.

La utilización de cuatro galgas cuadruplica la sensibilidad del puente respecto al puente de una sola galga, esto quiere decir que para una misma deformación la señal de salida es cuatro veces mayor. De igual forma que en el caso anterior, las galgas son compensadas en temperatura, es decir, cuando coinciden dos o las cuatro galgas los efectos de temperatura se anulan ya que le afectan a todas por igual.

Cuando las galgas que se encuentran situadas en las ramas opuestas del puente presentan una deformación de compresión y las otras dos por extensión, la tensión de salida es el doble que la tensión que se ofrecía en el puente de dos galgas ofreciendo, como se ha comentado en el párrafo anterior, compensación a los cambios de temperatura.

$$S = \frac{V_{in}}{R_0} \quad (3.11)$$

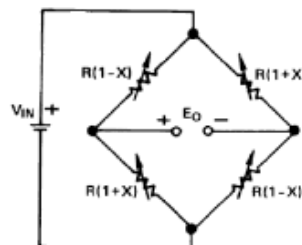


Figura 21: Puente de Wheatstone con cuatro galgas

### 3.2 ELECCIÓN CIRCUITO DE MEDIDA

Después de haber estudiado las distintas formas de medida y de las tensiones de salida con las galgas conectadas en el circuito del puente de *Wheatstone*, se decide que el circuito con cuatro galgas es el más apropiado (Figura 22).

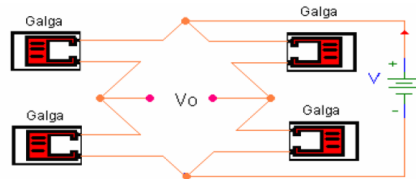


Figura 22: Configuración de puente de Wheatstone con cuatro galgas

Para ello, se han seleccionado cuatro galgas iguales para detectar deformaciones verticales de la viga y otras cuatro para deformaciones laterales u horizontales de la misma (figura 23). Las cuatro galgas seleccionadas para descubrir deformaciones verticales se colocarán dos en la parte superior de la viga para detectar deformaciones en tensión y las otras dos restantes en la parte inferior que revelarán deformaciones en compresión (figura 24). De la misma manera, dos galgas de las cuatro seleccionadas para deformaciones laterales se colocarán en un lado para mostrar deformaciones en tensión y las otras dos se colocarán en el otro lado de la viga y revelarán deformaciones en compresión. Luego, se utilizarán dos puentes de *Wheatstone* para detectar todas las posibles deformaciones de la viga.

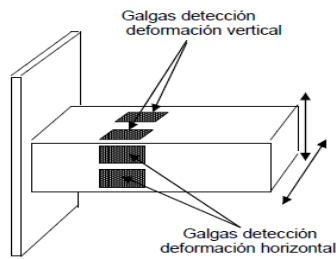


Figura 23: Situación de las galgas en la estructura

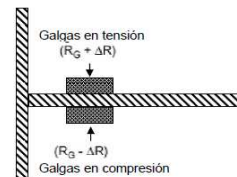


Figura 24: Colocación de las galgas para deformaciones verticales

La instalación de las galgas en el puente de *Wheatstone* para las deformaciones en tensión, según la figura 18, se corresponderán con las resistencias R1 y con R3, y las que detectarán las deformaciones en compresión se corresponderán con las resistencias R2 y R4. De esta manera, la tensión de salida del puente siempre será cero mientras no se produzca ninguna deformación en la viga voladizo.

Una vez diseñado la colocación de las galgas extensométricas en la viga, se procede a calcular las tensiones de salida del puente de *Wheatstone* y determinar los voltajes límite para señalar los estados de alarma. En primer lugar se calculará las tensiones cuando la deformación es en tensión.

- Estructura segura: valores comprendidos entre  $\epsilon=0$  y  $\epsilon=0,001$ . (Valores con deformación de una galga)

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \epsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0 = 0\Omega \quad (3.12)$$



$$x = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0}{120} = 0 \quad (3.13)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot x = 5 \cdot 0 = 0 \quad (3.14)$$

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,001 = 0,252 \Omega \quad (3.15)$$

$$x = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,252}{120} = 0,0021 \quad (3.16)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot x = 5 \cdot 0,0021 = 0,0105 = 10,5 mV \quad (3.17)$$

La estructura se encuentra en estado segura cuando la tensión de salida del puente corresponde al intervalo entre 0 y 10,5mV.

- Estructura aceptable pero necesita mantenimiento: valores comprendidos entre  $\varepsilon=0,001$  y  $\varepsilon=0,002$ . (Valores con deformación de una galga)

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,001 = 0,252 \Omega \quad (3.18)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot x = 5 \cdot 0,0021 = 0,0105 = 10,5 mV \quad (3.19)$$

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,002 = 0,504 \Omega \quad (3.20)$$

$$x = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,504}{120} = 0,0042 \quad (3.21)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot x = 5 \cdot 0,0042 = 0,021 = 21 mV \quad (3.22)$$

La estructura se encuentra en estado aceptable cuando la tensión de salida del puente se encuentra en el intervalo entre 10,5mV y 21mV.

- Estructura peligrosa: valores superiores a  $\varepsilon=0,002$ . (Valores con deformación de una galga)

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,002 = 0,504 \Omega \quad (3.23)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot x = 5 \cdot 0,0042 = 0,021 = 21 mV \quad (3.24)$$

La estructura será peligrosa cuando el valor de la tensión de salida del puente de *Wheatstone* es superior a 21mV.

Posteriormente, se calculará las tensiones de salida cuando las deformaciones de la estructura es de compresión.

- Estructura segura: valores comprendidos entre  $\varepsilon=0$  y  $\varepsilon=0,001$ . (Valores con deformación de una galga)

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0 = 0 \Omega \quad (3.25)$$

$$x = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0}{120} = 0 \quad (3.26)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot x = 5 \cdot 0 = 0 \quad (3.27)$$

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,001 = 0,252 \Omega \quad (3.28)$$

$$x = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,252}{120} = 0,0021 \quad (3.29)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot (-x) = 5 \cdot (-0,0021) = -0,0105 = -10,5 mV \quad (3.30)$$

La estructura se encuentra en estado segura cuando la tensión de salida del puente corresponde al intervalo entre 0 y -10,5mV.

- Estructura aceptable pero necesita mantenimiento: valores comprendidos entre  $\varepsilon=0,001$  y  $\varepsilon=0,002$ . (Valores con deformación de una galga)

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,001 = 0,252 \Omega \quad (3.31)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot (-x) = 5 \cdot (-0,0021) = -0,0105 = -10,5 mV \quad (3.32)$$

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,002 = 0,504 \Omega \quad (3.33)$$

$$x = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,504}{120} = 0,0042 \quad (3.34)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot (-x) = 5 \cdot (-0,0042) = -0,021 = -21 mV \quad (3.35)$$

La estructura se encuentra en estado aceptable cuando la tensión de salida del puente se encuentra en el intervalo entre -10,5mV y -21mV.

- Estructura peligrosa: valores superiores a  $\varepsilon=0,002$ . (Valores con deformación de una galga)

$$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon = 120 \cdot 2,1 \cdot 0,002 = 0,504 \Omega \quad (3.36)$$

$$E_0 = V_{in} \cdot (-x) = 5 \cdot (-0,0042) = -0,021 = -21 mV \quad (3.37)$$

La estructura será peligrosa cuando el valor de la tensión de salida del puente de Wheatstone es inferior a -21mV.

De acuerdo con el punto 2 del apartado 1.2 del capítulo 1 se debe diseñar un circuito que, dependiendo de las variaciones que pueden tener las galgas extensométricas, nos debe dar una medida para que nos informe de una posible deformación. Para ello, se ha realizado un estudio de un circuito, puente de *Wheatstone*, para que nos dé una tensión y nos indique el estado de la viga. Una vez realizado el circuito de medida, se han realizado los cálculos necesarios para obtener unas tensiones de referencia y nos muestre los valores de una posible deformación. Posteriormente, por medio de un simulador, se ha comprobado los datos verificando que la soluciones expuestas coincide, por lo que se puede confirmar que se ha cumplido el objetivo 2 del apartado 1.1 del capítulo 1.

Después de haber calculado las tensiones de salida del puente de *Wheatstone*, se puede observar que los voltajes son muy bajos, del orden de milivoltios, medidas muy pequeñas para poder utilizarlas en nuestro circuito. Para poder tener tensiones superiores se necesitará un elemento que eleve esas tensiones. El dispositivo que se utilizará será un amplificador. Este elemento se analizará en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DE LA ETAPA AMPLIFICADORA

Este capítulo comienza explicando la necesidad de los amplificadores y su definición. Entre toda la variedad de amplificadores, se ha escogido el amplificador de instrumentación, que como se detalla a continuación es el más apropiado para el diseño de nuestro circuito.

### 4.1 DEFINICIÓN

La diferencia que existe entre las tensiones de salida del puente de *Wheatstone* cuando ningún sensor se ha deformado es de 0V, ya que el valor de sus resistencias son iguales. Cuando alguna galga aumenta su resistencia debido a una deformación producida por la estructura, la diferencia entre los terminales de salida deja de ser cero, suministrando una señal que puede ser del orden de microvoltios o milivoltios. Como esta salida es muy pequeña para ser utilizada, se necesitará acondicionarla con el objetivo de obtener un nivel de tensión apropiado para su posterior manejo. Este dispositivo es un amplificador, que se caracteriza por ser un elemento que a partir de una señal de entrada permite aumentarla para luego poder ser procesada.

El sensor, nos provoca una tensión diferencial proporcional al cambio de su resistencia, posteriormente el amplificador eleva esta tensión para su posterior tratamiento [18]. Para ello, se debe elegir el amplificador más adecuado para nuestro circuito, con una ganancia elevada y una influencia del ruido mínima. Para tener una idea de cómo funcionan estos elementos se describirá entre otros, el amplificador de instrumentación.

### 4.2 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN

El amplificador instrumental se utiliza para amplificar señales pequeñas producidas por sensores, presentando una impedancia muy alta en su salida debido a la diferencia entre las dos tensiones de entrada. Esta tensión de salida depende de la diferencia entre los voltajes de entrada y la ganancia del amplificador (figura 25).

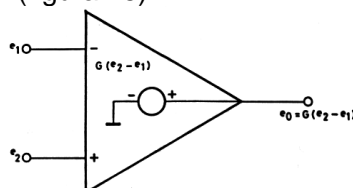


Figura 25: Amplificador de instrumentación

Está compuesto por tres amplificadores operacionales, como se muestra en la figura 27, dividido en dos etapas. La primera etapa son dos amplificadores no inversores y la segunda es un amplificador diferencial. La primera etapa o pre-amplificadora proporciona una elevada impedancia de entrada y la segunda etapa obtiene la ganancia de salida ajustado por una resistencia exterior  $R_G$  [19].

La calidad de un amplificador de instrumentación se identifica con la Relación de Rechazo de Modo Común (CMRR), que es la capacidad para rechazar señales provenientes de la entrada, es decir, el amplificador recibe las dos tensiones de c.c. del puente de *Wheatstone* más otra señal de c.a. que viene inducida por los hilos del amplificador, provocado por cualquier tipo de fuente cercana llamada ruido luego, el amplificador tiene la capacidad de rechazar este tipo de señales. Como se puede apreciar en la figura 26, la salida del puente se encuentra en equilibrio pero, existe una señal de 2,5 voltios con respecto a masa (ruido). Esta tensión es debido a interferencias que se inducen en el circuito y que no contribuyen a la medición que se quiere medir falseando la salida en el amplificador. Para ello, se utiliza el amplificador de instrumentación, ya que rechaza señales que entran en modo común [20]. Se expresa en decibelios (dB) y su expresión es:

$$CMRR [db] = 20 \log \left( \frac{A_D}{A_{CM}} \right) \quad (4.1)$$

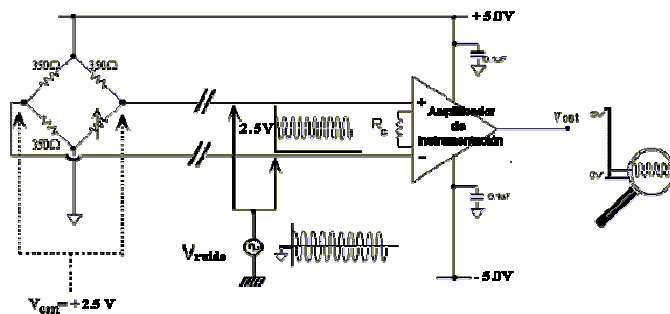


Figura 26: Rechazo en modo común en amplificador de instrumentación

A continuación, se realiza un análisis del amplificador de instrumentación, observando el comportamiento de una señal de entrada a lo largo del circuito. Este estudio, permitirá seleccionar el modelo de amplificador que sería necesario conectar a la salida del puente *Wheatstone*, para que la señal de salida suministrada por el amplificador sea una tensión aceptable para su posterior modelado [21].

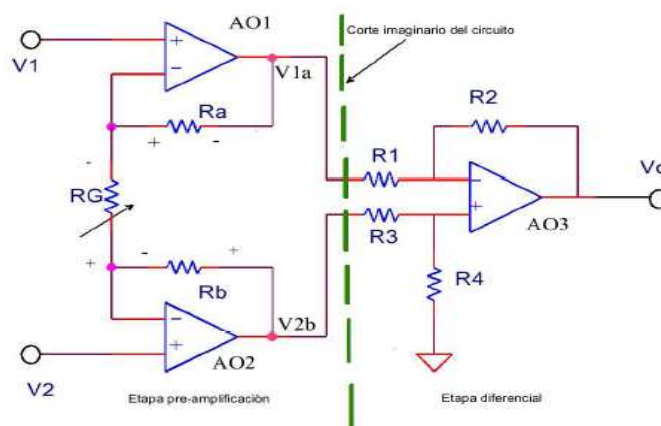


Figura 27: Circuito esquemático del amplificador de instrumentación

Se realiza un corte imaginario al amplificador de instrumentación para efectuar su análisis. Para ello, se ha dividido el circuito en una etapa pre-amplificadora y una etapa diferencial. La etapa pre-amplificadora está formada por dos amplificadores operacionales no inversores donde las tensiones  $V_{1a}$  y  $V_{2b}$  en función de la tensión de entrada  $V_1$  y  $V_2$  son:

$$V_{1a} = V_1 \left( \frac{R_a}{R_G} + 1 \right) - \frac{R_a}{R_G} V_2 \quad (4.2)$$

$$V_{2b} = V_2 \left( \frac{R_b}{R_G} + 1 \right) - \frac{R_b}{R_G} V_1 \quad (4.3)$$

La caída de tensión que existe entre  $V_{1a}$  y  $V_{2b}$  es:

$$V_{2b} - V_{1a} = (V_2 - V_1) \left( \frac{R_a + R_b}{R_G} + 1 \right) \quad (4.4)$$

Se puede observar en la expresión anterior que, sólo variando la resistencia  $R_G$  se puede variar la ganancia, obteniendo una tensión diferencial amplificada sin tener tensiones en modo común. Luego, en la etapa diferencial, la tensión de salida en  $V_0$  sería:

$$V_0 = \left( -\frac{R_2}{R_1} \right) V_{1a} + \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{2b} \quad (4.5)$$

Para hallar la salida total del amplificador  $V_0$ , se sustituye en la ecuación anterior 4.5 las tensiones halladas en 4.2 ( $V_{1a}$ ) y en 4.3 ( $V_{2b}$ ) anteriormente descritas, obteniendo el siguiente resultado:

$$V_0 = -V_D \left[ \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{R_b}{R_G} \right) + \frac{R_2}{R_1} \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{R_a}{R_G} \right) \right] + V_{CM} \cdot \left[ \frac{1 - \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \right] \quad (4.6)$$

De esta ecuación se deduce que el CMRR es máximo o la ganancia en modo común es cero cuando  $R_2/R_1 = R_4/R_3$ , es decir:

$$1 - \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4} = 0 \quad (4.7)$$

Además si igualamos  $2R_a/R_G = 2R_b/R_G$  tenemos que la amplificación diferencial se expresa como:

$$A_D = \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{2R_a}{R_G} \right) \quad (4.8)$$

De la misma manera, si el terminal "ref." del amplificador se conecta a una tensión de referencia, siempre que no se conecte a masa, la salida  $V_0$  quedaría [22]:

$$V_0 = A_D (V_1 - V_2) + V_{ref} \quad (4.9)$$

Por lo tanto, en un amplificador de instrumentación tenemos que:

- La resistencia  $R_G$  es quien controla la ganancia del amplificador sin afectar al ancho de banda, que suele ser elevado, y al CMRR teniendo este último un valor alto.
- Las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  pueden tener valores que no afectan en la amplificación del circuito ya que no existen tensiones de modo común a la salida de la etapa pre-amplificación.
- Se pueden obtener ganancias elevadas con valores de resistencias normales.
- La impedancia de entrada es muy elevada evitando que se produzca el efecto de carga.
- La impedancia de salida y las tensiones y corrientes de desequilibrio (offset) son bajas.

Una vez explicado el comportamiento del amplificador de instrumentación, se elegirá uno para amplificar el circuito diseñado. Para ello, se ha tomado en cuenta las indicaciones explicadas anteriormente.

Entre varios amplificadores de instrumentación vistos en el mercado como el "ANALOG DEVICES - AD8227ARZ - IC, AMP, INSTR, R-R, 250KHZ, 8SOIC" con un precio de 5,12 €, el amplificador de instrumentación "AMP02FP" con un valor de 10,20 €, el "AD524" con un precio de 40,19 € y el "INA 327 de Texas Instruments" a 3,66 €, el amplificador elegido es el *INA 327 de Texas Instruments* (figura 26) por ser un amplificador de baja potencia, ofreciendo una buena precisión y precio (ver anexo). Está compuesto por tres amplificadores operaciones retroalimentados, entregando un ancho de banda y una ganancia alta, proporciona un ruido muy bajo y compensación del offset. Además, el precio del amplificador, como se ha comentado anteriormente, hace que sea el elemento más apropiado para el circuito.

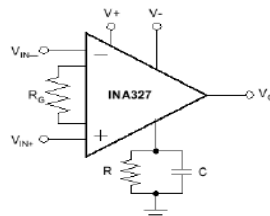


Figura 28: Amplificador INA327

La resistencia  $R_G$  del amplificador "INA 327" viene determinada por la fórmula siguiente, donde se determina el valor de la ganancia:

$$G = 2 \left( R / R_G \right) \quad (4.10)$$

y la tensión de salida de este amplificador es la diferencia de las tensiones de entrada por la ganancia más la tensión de referencia:

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} \quad (4.11)$$

Para calcular el valor de  $R_G$ , *Texas Instruments* pone a disposición los *DataSheet* de este amplificador, unas tablas donde se puede determinar los valores de las resistencias  $R_G$ ,  $R$  y el condensador.

GANANCIA	RG (Ω)	R (Ω)	C (nF)
0.1	400k	20k	5
0.2	400k	40k	2.5
0.5	400k	10k	1
1	400k	200k	0.5
2	200k	200k	0.5
5	80k	200k	0.5
10	40k	200k	0.5
20	20k	200k	0.5
50	8k	200k	0.5
<b>100</b>	<b>4k</b>	<b>200k</b>	<b>0.5</b>
200	2k	200k	0.5
500	2k	500k	0.2
1000	2k	1M	0.1
2000	2k	2M	0.05
5000	2k	5M	0.02
10000	2k	10M	0.01

Tabla 7: Valores ganancia del amplificador

Para ajustar la resistencia RG al circuito, la señal de salida que nos proporciona el sensor debe ser tal que al obtener una resistencia máxima de la galga, el amplificador debe entregar una salida de tensión alrededor de 5 voltios en la parte positiva. Para ello, si aplicamos la expresión 4.11 para una tensión de 21 mA, que es cuando la estructura presenta un estado peligroso, tenemos que:

$$G = \frac{5V - 2,5V}{0,021A} = 119 \quad (4.12)$$

Y según la tabla que nos proporciona *Texas Instruments* del amplificador, el valor que más se aproxima es cuando G=100. Luego, los valores a escoger son:

G=100  
 RG=4K  
 R=200K  
 C=0,5nF

Si se escoge una ganancia de G=200, la tensión de salida máxima supera los 5 voltios y con una ganancia de G=50 la tensión de salida no alcanza los 5 voltios.

### 4.3 CÁLCULOS DE LA ETAPA AMPLIFICADORA

Una vez escogidos los valores propios del amplificador, se procede a calcular las tensiones de salida del mismo. Para ello, se debe coger los voltajes procedentes del puente de *Wheatstone* que se calculó en el apartado 3.2 del capítulo 3 para determinar los valores límite que señalarán los estados de alarma. Se calculará las tensiones a la salida del amplificador tanto cuando la viga se deforme en tensión como en compresión.

- Estructura segura: valores comprendidos entre 0V y 10,5mV (deformación en tensión) o entre 0V y -10,5mV (deformación en compresión)

Deformación en tensión

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 (2,5V - 2,5V) + 2,5V = 2,5V \quad (4.13)$$

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot 0,0105 + 2,5V = 3,55V \quad (4.14)$$

Deformación en compresión

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 (2,5V - 2,5V) + 2,5V = 2,5V \quad (4.15)$$

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot (-0,0105) + 2,5V = 1,45V \quad (4.16)$$

La estructura se encontrará en estado seguro cuando la tensión de salida del amplificador esté comprendida entre 2,5V y 3,55V o entre 1,45V y 2,5V, es decir, cuando la tensión de salida del amplificador se encuentre en el intervalo entre 1,45V y 3,55V.

- Estructura en estado aceptable: valores comprendidos entre 10,5mV y 21mV o entre -21mV y -10,5mV.

Deformación en tensión

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot 0,0105 + 2,5V = 3,55V \quad (4.17)$$

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot 0,021 + 2,5V = 4,6V \quad (4.18)$$

Deformación en compresión

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot (-0,0105) + 2,5V = 1,45V \quad (4.19)$$

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot (-0,021) + 2,5V = 0,4V \quad (4.20)$$

La viga se encontrará en un estado aceptable, aunque necesitará un mantenimiento, cuando el voltaje de salida del amplificador se encuentre entre 3,55V y 4,6V o entre 0,4V y 1,45V

- Estructura peligrosa: valores superiores a 21 mV o inferiores a -21V.

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot 0,021 + 2,5V = 4,6V \quad (4.21)$$

$$V_0 = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{ref} = 100 \cdot (-0,021) + 2,5V = -1,7mV = 0,4V \quad (4.22)$$

La salida del amplificador nos dará un estado de emergencia cuando la tensión supere los 4,6V o sea inferior a 0,4V.

A continuación, y con ayuda de las gráficas de *TINA-TI*, exponemos las salidas de tensión de los amplificadores según las posibles deformaciones que se pueden producir en la



estructura. Como se puede apreciar, los resultados coinciden con los cálculos resueltos en la teoría.

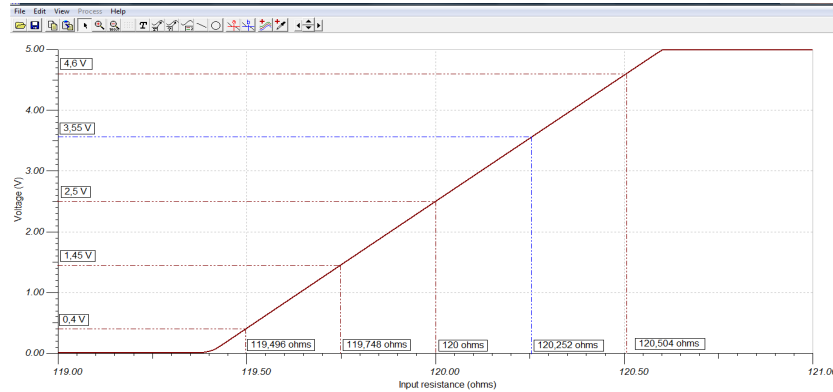


Figura 29: Grafica tensión-resistencia

El diseño del circuito definitivo queda de la siguiente manera:

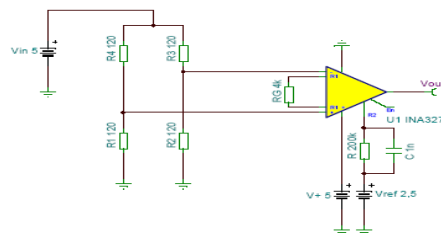


Figura 30: Circuito de medida con etapa amplificadora

Como se ha podido comprobar en este capítulo, se ha realizado un estudio del amplificador del instrumentación para realizar posteriormente los cálculos de salida del mismo, que dependiendo de los valores límite calculados en el capítulo anterior, nos dará una tensión de salida amplificada. Estos voltajes serán los umbrales que nos determinarán si la estructura se encuentra segura, aceptable o peligrosa. Posteriormente, se ha realizado una simulación con el programa *TINA* y se ha comprobado que la salida del amplificador coincide con los resultados calculados anteriormente. Por consiguiente, podemos confirmar que se ha cumplido el objetivo del diseño de la etapa amplificadora enunciada en el punto 3 del apartado 1.1 del capítulo 1.

En este capítulo se ha comprobado que un amplificador aumenta una tensión recibida, no obstante, hay amplificadores con diferentes funciones que, dependiendo del circuito, se pueden utilizar operacionales con funciones de comparación, inversoras, sumadoras, restador, etc. Para ello, el siguiente componente para el desarrollo y funcionamiento del circuito será los comparadores de tensión que serán los encargados de seleccionar, dependiendo de la tensión de salida del amplificador de instrumentación, si la estructura se encuentra en buenas condiciones o está en una situación de peligro. Por consiguiente, en el capítulo 5 se investigará estos elementos para el diseño de un circuito discriminador.

## CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL CIRCUITO DISCRIMINADOR

Para tratar la señal de salida del amplificador de instrumentación visto en el capítulo 4, se va a utilizar unos amplificadores cuya función será comparar esta tensión con las tensiones límite calculadas en ese mismo capítulo. Cuando la tensión de salida del amplificador anterior supere las tensiones límite, un elemento deberá dar una tensión de salida cuya señal se tratará para dar lugar a una alarma que nos indique el estado de la estructura [23]. Luego, el elemento elegido para dar esta alarma es el comparador de tensión.

Para el diseño del circuito discriminador se necesita tantos comparadores como estados de alarma, pero como hay dos estados que coinciden, dependiendo si se señala la situación de la estructura en compresión o en tensión, como es el estado seguro, se diseñará un circuito discriminador con seis comparadores para señalar cinco estados. Además, para que estos elementos indiquen la señal de los estados límite, se requiere que estén conectados a una línea de tensión repartida, es decir, cada comparador estará conectado a una tensión de referencia que será el voltaje límite. Para ello, se configurará un circuito con varias resistencias en serie cuya función será reducir la tensión, como se puede observar en la figura 31.

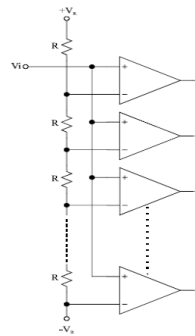


Figura 31: Circuito discriminador analógico

### 5.1 COMPARADOR

Los amplificadores son elementos muy utilizados en los circuitos electrónicos ya que, dependiendo de la función del circuito, se puede obtener con ellos multitud de funciones y aplicaciones. La función más básica del amplificador es aumentar la diferencia de tensión entre sus dos entradas (figura 32), donde la tensión de salida  $V_o = G (V_a - V_b)$ , siendo G la ganancia diferencial del amplificador.

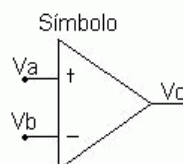


Figura 32: Amplificador básico

Si la diferencia entre las tensiones de entrada es muy grande el amplificador entra en estado de saturación. Si  $V_a > V_b$  la saturación es positiva y si  $V_a < V_b$  la saturación es negativa, luego la tensión de salida no superará la tensión de entrada positiva ni será inferior a la entrada negativa.

El funcionamiento del comparador de tensión (figura 33) es comparar las tensiones de entrada y en función de cual es mayor da una señal de salida. Esto es debido a que el operacional se utiliza en lazo abierto, es decir, tiene ganancia máxima. Si la tensión de entrada es superior a la tensión que se utiliza como referencia (figura 34), que siempre es un valor fijo, la salida estará en saturación negativa o positiva dependiendo si el comparador es inversor o no inversor.

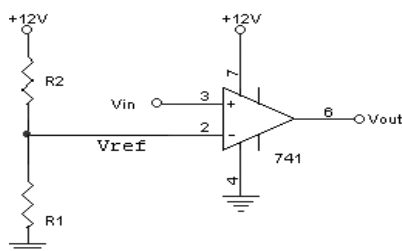


Figura 33: Comparador de tensión

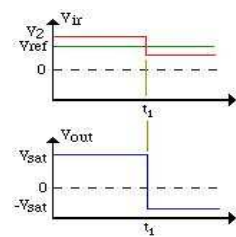


Figura 34: Gráfica de la tensión de salida del comparador

Como se puede observar en la figura 33, si la tensión de entrada  $V_{in}$  supera la tensión de referencia ( $V_{ref}$ ), la salida será un número positivo cercano a la tensión de entrada, pero si la tensión de referencia supera a  $V_{in}$  la salida será un número negativo cercano a cero voltios. La tensión de referencia se puede calcular según la expresión:

$$V_{ref} = V_{entrada} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.1)$$

donde  $V_{entrada}$  (figura 33), en este caso, es 12v, que es el voltaje del divisor tensión [24].

El comparador puede ser No inversor o Inversor. Si la tensión de referencia se le aplica a la entrada inversora y la señal a la entrada no inversora el comparador será no inversor. De la misma manera, si la tensión de referencia se aplica a la entrada no inversora del operacional y la señal a la entrada inversora, el comparador es inversor [25].

## 5.2 DIVISOR DE TENSION

Hay circuitos donde se necesitan una tensión lo más estable posible, como circuitos de medidas, alimentaciones reguladas, etc. La forma más sencilla para obtener una fuente de tensión estable sería utilizar un divisor de tensión por medio de resistencias.

Un divisor de tensión [24] es la conexión en serie de dos o más resistencias de forma que la tensión de entrada se conecta a las resistencias y la tensión de salida se obtiene en el punto medio entre dos resistencias, como se puede apreciar en la figura 35.

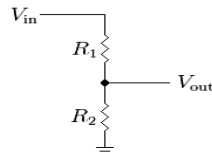


Figura 35: Divisor de tensión

### 5.3 CÁLCULOS DEL CIRCUITO DISCRIMINADOR

Para realizar los cálculos del circuito, se tendrá en cuenta lo explicado en los apartados 5.1 y 5.2 de este capítulo. Para ello, hay que tener en cuenta que se necesita seis operacionales para dar una señal cuando la estructura se encuentra en perfecto estado, cuando está aceptable y cuando se encuentra en una situación de peligro.

Los comparadores se conectarán a una línea de tensión (figura 31) donde van conectadas unas resistencias en serie para obtener una tensión de referencia fija y la otra entrada se conectará a la tensión de salida del amplificador de instrumentación.

Se calculará dos circuitos discriminadores, uno para entregar una señal de estados cuando la estructura se deforme en horizontal y otro en vertical. Para ello, se tendrá en cuenta los resultados calculados en el apartado 4.3 del capítulo 4.

#### 5.3.1 Cálculos de deformaciones en viga

Se sabe que la tensión de entrada es la suma de las caídas de tensión de las resistencias:

$$V_{in} = I (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \quad (5.2)$$

Sustituyendo el valor de la tensión en cada resistencia se deduce que el voltaje de entrada es la suma de las caídas de tensión en cada resistencia, luego:

$$V_{in} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (5.3)$$

#### Deformación de la viga en tensión

Si se tiene que el voltaje límite cuando la estructura se encuentra en peligro es de 4,6 voltios o superior, de 3,55 hasta 4,6 voltios cuando la viga se encuentra en un estado aceptable y de 2,5 a 3,55 voltios cuando la estructura se encuentra en perfectas condiciones tenemos que:

$$V_1 = V_{in} - 4,6V = 5V - 4,6V = 0,4V$$

$$V_2 = V_{in} - V_1 - 3,55V = 5V - 0,4V - 3,55V = 1,05V$$

$$V_3 = V_{in} - V_1 - V_2 - 2,5 = 5V - 0,4V - 1,05V - 2,5V = 1,05V$$

$$V_4 = V_{in} - V_1 - V_2 - V_3 - 0 = 5V - 0,4V - 1,05V - 1,05V - 0 = 2,5V$$

y los valores de las resistencias tomando como intensidad en el circuito de 1mA son:

$$R_1 = \frac{V_1}{I} = \frac{0,4V}{0,001A} = 400\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_2}{I} = \frac{1,05V}{0,001A} = 1050\Omega$$

$$R_3 = \frac{V_3}{I} = \frac{1,05V}{0,001A} = 1050\Omega$$

$$R_4 = \frac{V_4}{I} = \frac{2,5}{0,001A} = 2500\Omega$$

### Deformación de la viga en compresión

De la misma manera que en el caso anterior, tenemos que la estructura estará en un estado de peligro cuando la tensión de salida del amplificador de instrumentación sea de 0,4 voltios o inferior, cuando la tensión se encuentre comprendida entre 0,4 y 1,45 voltios, la viga se encontrará en una situación aceptable y cuando la tensión se sitúe entre 1,45 y 2,5 voltios, la estructura estará en una situación segura, luego tenemos que:

$$V_5 = V_{in} - 2,5V = 5V - 2,5V = 2,5V$$

$$V_6 = V_{in} - V_5 - 1,45V = 5V - 2,5V - 1,45V = 1,05V$$

$$V_7 = V_{in} - V_5 - V_6 - 0,4 = 5V - 2,5V - 1,05V - 0,4V = 1,05V$$

$$V_8 = V_{in} - V_5 - V_6 - V_7 - 0 = 5V - 2,5V - 1,05V - 1,05V - 0 = 0,4V$$

y los valores de las resistencias tomando como intensidad en el circuito de 1mA son:

$$R_5 = \frac{V_5}{I} = \frac{2,5V}{0,001A} = 2500\Omega$$

$$R_6 = \frac{V_6}{I} = \frac{1,05V}{0,001A} = 1050\Omega$$

$$R_7 = \frac{V_7}{I} = \frac{1,05V}{0,001A} = 1050\Omega$$

$$R_8 = \frac{V_8}{I} = \frac{0,4}{0,001A} = 400\Omega$$

Como se puede observar, se ha diferenciado los cálculos para comprobar cuales son las tensiones y las resistencias cuando se produce deformaciones en tensión o en compresión. Aún así, como se ha explicado en el apartado 5.2 de este mismo capítulo, el

divisor de tensión debe estar compuesto por todas las resistencias calculadas (figura 36) tanto para deformaciones en tensión como de compresión ya que así se minimiza el circuito.

Como se puede apreciar en la figura 36, dos comparadores dan salida de tensión a la vez, debido a que una de sus entradas (voltaje del amplificador de instrumentación) es superior a la otra (tensión de referencia del divisor de tensión), como se ha detallado en este capítulo. Al variar la resistencia de las galgas, el amplificador de instrumentación varía su tensión, este voltaje lo compara los operacionales con las tensiones de referencia ofrecidas por el divisor de tensión, dando salida los comparadores correspondientes, como se puede reflejar en la figura 36 derecha. Luego, una vez comprobado el funcionamiento de los comparadores con sus tensiones de referencias que reciben del divisor de tensión, podemos decir que se ha cumplido el objetivo número 4 del apartado 1.1 del capítulo 1.

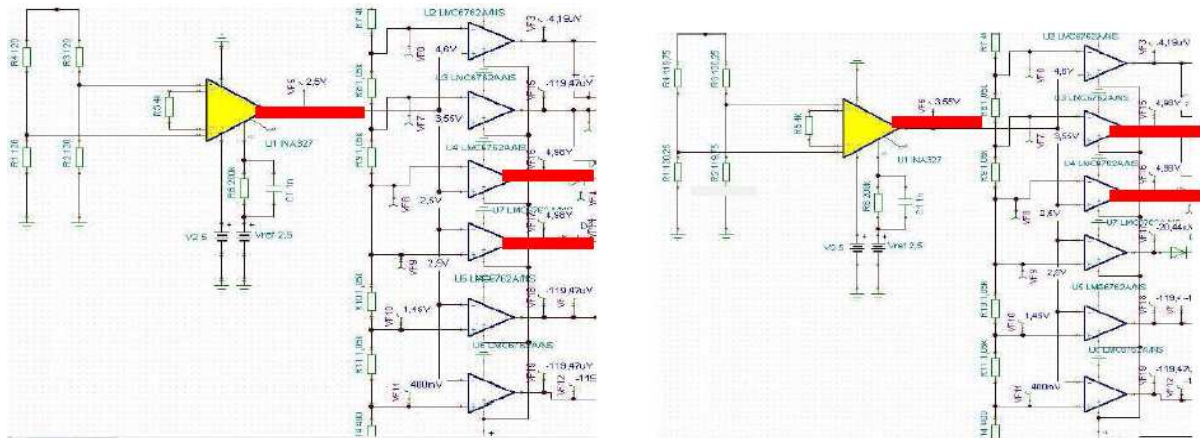


Figura 36: Circuito discriminador

Una vez calculados los valores de las resistencias, los comparadores deben mandar una señal a un elemento acústico o visual, dependiendo de los valores de las galgas extensométricas, donde se compruebe el estado de la estructura. Para ello, se debe diseñar un circuito cuya función sea indicar sobre los cambios que presenten la viga.

## CAPÍTULO 6. DISEÑO MÓDULO DE ALARMAS

En el capítulo anterior, se ha diseñado un circuito con comparadores de tensión, donde por medio de unos divisores de voltaje, darán una señal de salida dependiendo si el valor del amplificador de instrumentación es mayor o menor que de la tensión de referencia de los divisores. Estos operacionales compararan las dos tensiones de entrada y dará por su salida una tensión que servirá para comprobar el estado de la viga. Esta señal se encargará de alimentar a un dispositivo que será el encargado de avisar sobre el estado de la estructura.

Para ello, se diseñará un módulo, que será parte integrante del circuito, que indicará el estado de la viga. Este módulo será un circuito de alarma.

### 6.1 CONTITUCIÓN DEL MÓDULO DE ALARMA

El módulo de alarma estará compuesto de una serie de elementos que, dependiendo de su conexión, mostrará una señal que advertirá sobre una situación de estado de la estructura.

Los elementos necesarios para la construcción del módulo de alarma son:

- Diodos LED
- Puertas lógicas (And)
- Relé
- Señalización óptica y acústica

Los Leds elegidos (5 mm) son el CQX35A (rojo), CQX36A (verde) y el CQX37A (amarillo). Se alimentarán con una tensión que dependerá de las de los colores elegidos y circulará una corriente, dependiendo de las características de los leds, de 50 mA para el color rojo, de 30 a 50 mA para el verde e inferior a 30 mA para el amarillo (aunque en el simulador *TINA* no se ha tenido en cuenta ya que, estos valores influyen desfavorablemente en su funcionamiento). Además, para el cálculo de las resistencias limitadoras de los leds se aplicará la ley de Ohm, aunque en el simulador, no ha sido posible ya que no se activan con las tensiones especificadas para los diferentes leds. El precio de cada led es de 0,11 €. Las puertas lógicas estarán alimentadas por una tensión aproximada de 5V siendo el precio aproximado de 0,658 € por unidad y los relés trabajarán también a una tensión de alimentación de 5 Voltios, siendo su precio unitario de 3,75 €.

Los fabricantes de los LED, puertas lógicas y relé elegidos han sido los que vienen por defecto en el programa *TINA*. De todas maneras, se hubieran elegido cualquiera ya que, es un elemento que prácticamente se venden en todas las tiendas de electrónica y tanto los fabricantes como los precios de estos materiales son muy similares.

Los avisadores acústicos y luminosos estarán colocados en un lugar relativamente alejado de la estructura. Para ello, estarán alimentados por una tensión de 220V y se activarán cuando el relé asociado al led que identifica el estado de la viga esté alimentado. Para reducir el coste de la instalación, se elegirá un elemento donde será a la vez avisador acústico y luminoso cuando la estructura se encuentre en un estado de peligro mientras que en los

demás estados se instalará sólo una señal luminosa. El modelo elegido es el RZAR21 de RODMAN D\_K con un precio de 283,70 € cada una para la señal acústica y luminosa y los modelos RAL1A1 y RAL1V1 dependiendo si el color del avisador es de color amarillo o verde respectivamente, para una señal luminosa siendo el precio unitario de 53,80 €. Se ha elegido este material por la rapidez del plazo de entrega aunque nos hubiera servido otro, siempre y cuando los precios y los plazos de entrega sean similares.

El funcionamiento del módulo de alarma es el siguiente (figura 37):

Cuando el amplificador de instrumentación da una tensión de salida, los comparadores comprueban este voltaje con su tensión de referencia, si la tensión del amplificador es superior al de referencia, el comparador correspondiente da una salida similar al de la fuente de alimentación (5 voltios) alimentando al led y al relé que le corresponde.

Sin embargo, y de acuerdo con el diseño mostrado en la figura 37, la activación de una alarma intermedia daría lugar a la activación también de una alarma superior o inferior (si la alarma es de tensión o compresión respectivamente) ya que el comparador daría salida positiva también en este caso. En consecuencia, ambos leds se encenderían.

Para que dos leds o más no se activen a la misma vez, se ha incorporado unas puertas lógicas “AND” con entradas negadas, menos la entrada del comparador que le corresponde dar su salida de tensión, es decir, la salida del comparador va directamente a la entrada de su puerta lógica, y las demás salidas de los comparadores que pueden dar una tensión similar al comparador correspondiente, va conectada a la puerta lógica “AND” negada. Esto quiere decir que, para que se encienda el led y el relé de su comparador, hace falta que su puerta lógica reciba directamente tensión y las demás entradas a la puerta que están conectadas a otros comparadores, no den tensión de salida. De esta forma, nunca se encenderá dos leds a la vez. De la misma manera, como los relés se accionan cuando se enciende su led correspondiente, éste cierra su contacto libre de potencial dando tensión a una lámpara y/o a una sirena.

Luego, una vez comprobado el funcionamiento del módulo de alarma, se puede concretar que se ha cumplido el objetivo número 5 del apartado 1.1 del capítulo 1.

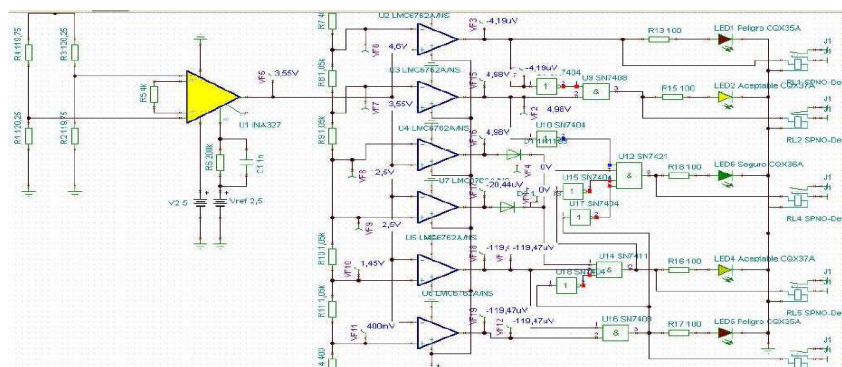


Figura 37: Módulo de alarma



## CAPÍTULO 7. DISEÑO DEL LAYOUT DE LA PLACA DEL CIRCUITO

Para que todos los componentes definan un camino concreto se establecerá las conexiones que forman las pistas o conductores del circuito, es lo que se denomina el diseño del layout del circuito. Para ello, se utilizará un editor que establezca el *layout* o trazado de las conexiones de cobre de la placa del circuito impreso (*PCB*). Luego, la finalidad del *Layout* es la de realizar el diseño de las placas del circuito impreso.

El diseño de la placa electrónica se puede iniciar directamente desde cualquier programa de diseño del *PCB* (*Layout*) o desde un programa donde anteriormente se debe haber realizado el esquemático del circuito para que, posteriormente, este programa lo cambie a *PCB*. El problema de este último es que coloca a los componentes de una forma determinada que generalmente no es la apropiada, por lo que se debe realizar la disposición de los componentes de manera manual para evitar que las conexiones del circuito se cortocircuiten.

La placa del circuito impreso es una plancha de baquelita donde van destinados todos los componentes electrónicos de un circuito unidos mediante soldadura. En las caras de la placa se establece la conectividad de los componentes del circuito mediante cobre que tiene ya la placa, mientras que en una sola cara se suele hacer unos taladros para incrustar los elementos necesarios para el funcionamiento del circuito [34].

La placa estará compuesta por dos capas o *layer PCB* y se utilizará la tecnología *THT* (tecnología de agujeros pasantes), ya que la placa contiene muchas pistas. En este tipo de tarjetas, las patas de los elementos que componen el circuito se insertan en los orificios o vías ajustándolos eléctrica y mecánicamente por medio de una soldadura. En el ensamblado, se utilizará la soldadura máscara de soldado, con la intención de evitar cortocircuitar accidentalmente dos *tracks* de nodos distintos. El *stackup* (espesor de la placa) tendrá una altura de 1,6 mm, una anchura de pista de 0,15 mm, respetando un espacio mínimo de 0,15 mm, ajustando unas perforaciones o vías de 1,8 mm. Los componentes a utilizar son los *thru-hole pads*, por lo que la placa sólo tendrá elementos en la capa Top o un lado de la placa y la soldadura se realizarán en la cara opuesta (capa Bottom) aunque la placa contendrá pistas por los dos lados [35].

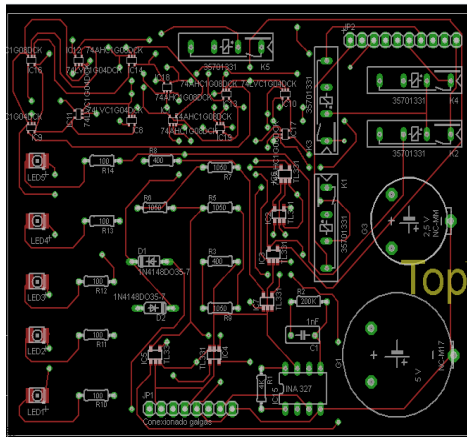


Figura 38: Capa Top de la PCB

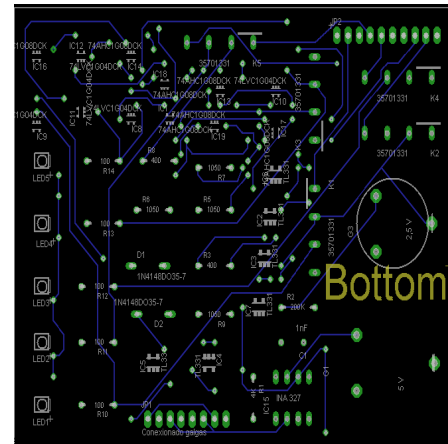


Figura 39: Capa Bottom de la PCB

No se ha podido realizar las medidas anteriormente descritas, ya que al ser un programa DEMO, tiene ciertas limitaciones, como es la medida máxima de la placa. Al ser esta medida máxima de la placa pequeña, no ha quedado suficiente espacio como para tener un ancho de pista apropiado ni los taladros descritos, por lo que se ha tenido que reducir la composición de la placa.

La PCB de nuestro circuito electrónico, como se puede apreciar en las figuras 38 y 39, se ha realizado con el programa *Eagle*. Para ello, después de haber realizado el esquemático, se ha procedido a realizar prácticamente el ruteo de forma manual, ya que en automático ha habido bastantes elementos sin conectar. La posición de estos elementos se ha distribuido de manera que las pistas tuvieran el menor recorrido posible. Además, había que contar con las posiciones que deberían ocupar las baterías y los pines de conexión, ya que estos elementos deben estar situados cerca del límite de la placa para poder conectar los elementos externos, así como facilitar el acceso a las baterías para su recambio.

Junto a esta memoria, se adjunta en un archivo rar, el diseño de la PCB tanto de la cara Top (cara superior) como de la cara Bottom (cara inferior) con los componentes incluidos y sin incluir. Además de cuatro pdf donde van serigrafados estas dos caras más la cara Top y Bottom con sus componentes. Estos pdf se utilizarían para la fabricación del circuito electrónico.

## CAPÍTULO 8. COSTE DEL PROYECTO

En este capítulo, se va a realizar una valoración económica del prototipo del cual se ha basado el proyecto. Esta valoración estará compuesta por los costes de desarrollo, los tecnológicos y los de implantación. Los costes de desarrollo es el precio del estudio realizado en el proyecto, es decir, las horas dedicadas del ingeniero en el estudio previo, diseño, pruebas, etc. Los costes tecnológicos son los importes de los materiales necesarios para la realización del circuito, así como los costes de fabricación del mismo. Los costes de implantación es el valor de la mano de obra necesaria para el montaje de las galgas, circuito y los elementos del módulo de alarma.

Para ello, hay que tener en cuenta que, aunque se ha realizado un estudio del diseño de un circuito, se necesitará dos circuitos electrónicos, unos para detectar deformaciones horizontales y otro para verticales. Luego, se tendrá en cuenta que los materiales y los precios expuestos en la tabla 8 hacen referencia a los dos circuitos.

Con respecto a la mano de obra, como se ha detallado anteriormente, se ha tenido en cuenta el montaje de las dos placas electrónicas, la colocación de las galgas extensométricas y los circuitos en la viga, colocación de los avisadores luminosos y acústicos en el lugar especificado y el conexionado eléctrico.

El coste de desarrollo será sobre presupuesto cerrado de acuerdo a unas horas prefijadas y corresponderá al estudio de viabilidad del proyecto, diseño del circuito, selección de los elementos necesarios, pruebas y confección de la documentación.

Con respecto a los costes tecnológicos, además del precio de los materiales, se tendrá en cuenta la fabricación de la placa electrónica. Para ello, estará incluido el atacado de la placa, perforado del circuito, montaje de los componentes, estañado, serigrafía y pruebas de funcionamiento.

La valoración de este presupuesto es sobre la realización de un solo prototipo, si se quisiera fabricar más circuitos para su venta se reduciría considerablemente el precio unitario del circuito ya que los costos de desarrollo ya estarían realizados pero además, las horas de montaje de la placa también se reduciría ya que fabricaría en una cadena de montaje.

El precio del prototipo se desglosa en la tabla 8.

Galgas extensométricas	RS 308-118	8	5,80 €	46,40 €
Resistencias		26	0,16 €	4,16 €
Amplificador Instrumentación	INA 327	2	3,66 €	7,32 €
Condensador	CT 100P3KV	2	0,22 €	0,44 €
Comparador	LM339N	12	0,15 €	1,80 €
Puestas lógicas	SN74*	24	0,66 €	15,79 €
LED	CQX*	10	0,11 €	1,10 €
Diodo	1N1 183	4	0,88 €	3,52 €
Relé	SPNO	10	3,75 €	37,50 €
Avisador acústico/luminoso	RZAR21	4	283,70 €	1.134,80 €
Avisador luminoso	RAL1*	6	53,80 €	322,80 €
Fabricación del circuito electrónico (PCB)				4.600,00 €
<b>Total costes tecnológicos</b>				<b>6.175,63 €</b>
Montaje galgas extensométricas/hora		15	20,00 €	300,00 €
Montaje placas PCB en estructura/hora		10	20,00 €	200,00 €
Montaje elementos acústicos/luminosos/hora		12	20,00 €	240,00 €
Conexión eléctrico de los elementos/hora		20	20,00 €	400,00 €
<b>Total costes implantación</b>				<b>1.140,00 €</b>
Viabilidad del proyecto/hora		50	25,00 €	1.250,00 €
Diseño del prototipo/hora		150	25,00 €	3.750,00 €
Pruebas funcionales/hora		50	25,00 €	1.250,00 €
Confección documentación/hora		80	25,00 €	2.000,00 €
<b>Total costes de desarrollo</b>				<b>8.250,00 €</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>				<b>15.565,63 €</b>

Tabla 8: Valoración económica

## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

El objetivo principal de este proyecto ha sido la realización del diseño de un sistema de evaluación de la integridad estructural. Para ello, se ha proporcionado una herramienta con el fin de obtener información del estado de la estructura y mandar una señal de alarma si la viga sufriera alguna deformación.

Durante la realización de este trabajo final de carrera se ha intentado explicar de forma clara el estudio de cada elemento que compone el circuito, llevando a cabo un proceso de estudio, análisis y diseño sobre la idea que se intenta desarrollar, mostrando además, por medio de figuras y tablas, el funcionamiento de cada segmento, adquiriendo los conocimientos teóricos básicos para la correcta evolución de la asignatura.

El diseño del circuito electrónico se ha obtenido gracias al estudio de cada uno de los componentes que lo forman, habiendo adquiridos unos conocimientos electrónicos que durante mi etapa profesional siempre he deseado. Aún así, debido a mi experiencia laboral en la rama eléctrica lograda durante mis estudios realizados anteriormente y a mi etapa profesional, ha sido, en varias ocasiones, un impedimento para seguir un proceso adecuado en la realización del trabajo por querer implantar estas nociones al diseño del circuito.

A nivel personal, he estado muy implicado en la realización del presente proyecto, no obstante, ha habido complicaciones en el seguimiento del trabajo debido a problemas laborales y familiares que ha resultado que se incumplirá el programa aportado al principio de curso. De todas maneras, solventando estas dificultades, se ha intentado seguir con el mismo interés y aspiración para intentar, en tiempo y forma, la finalización del trabajo final de carrera.

Una parte importante que se ha tenido en cuenta en la realización del trabajo aunque no se ha implantado es el ruido electrónico que es sometido a las líneas electrónicas que afectan al sistema pero, debido a que prácticamente el circuito está compuesto por pocos elementos y la conducción eléctrica es pequeña este ruido es inapreciable.

Se puede tener en cuenta en un futuro que, aunque la alimentación eléctrica de la placa electrónica es por medio de baterías a cinco voltios y aunque el consumo es muy pequeño aumentando la vida de estas acumuladores, cabe la posibilidad de que la placa pudiera ser alimentada por una fuente de alimentación solar evitando tener que estar pendiente de la descarga de las baterías para realizar el cambio de éstas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Educarchile “Guía para la formulación de proyectos”, consultado el 10/02/2011. URL: [http://www.educarchile.cl/UserFiles/P0029/File/Objetos\\_Didacticos/ELE\\_03/Recursos\\_para\\_la\\_Actividad/Formulacion\\_de\\_Proyectos.doc](http://www.educarchile.cl/UserFiles/P0029/File/Objetos_Didacticos/ELE_03/Recursos_para_la_Actividad/Formulacion_de_Proyectos.doc)
- [2] Wikipedia (anónimo). “Galga extensométrica”, actualizada el 5 de marzo de 2011, consultado el 07/03/2011. URL: [http://es.wikipedia.org/wiki/Galga\\_extensiom%C3%A9trica](http://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensiom%C3%A9trica)
- [3] National Instruments (Institucional). “Acondicionamiento para Señales de Galgas Extensiométricas”, consultado el 07/03/2011. URL: <http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/D0C6F7423F646D1B86256F34007C71A2>
- [4] Universidad Nacional Experimental de Táchira (Institucional). “Galgas Extensométricas”, consultado el 09/03/2011. URL: <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/GALGAS1.HTM>
- [5] Todo sobre la electrónica y las nuevas tecnologías (Institucional). “Electrodinámica”, actualizado el 30 de octubre de 2010, consultado el 08/03/2011. URL: <http://www.ifent.org/lecciones/electrodinamica/el dinami315.asp>
- [6] Gálvez Díaz-Rubio, F. 2004. Capítulo3. “Bandas Extensométricas”. URL: <http://www.mater.upm.es/Docencia/Materiales/Instrumentacion/Teoria/Inst03.pdf>
- [7] Capítulo 2. “Selección del sensor para la medición del movimiento aductor de los dedos de la mano”. URL: <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/999/6/T10768CAP2.pdf>
- [8] Educación de personas adultas (EPA virtual) Resistencia eléctrica de un conductor. Consulta el 17 de marzo de 2011. URL: [http://redesformacion.jccm.es/aula\\_abierta/contenido/97/387/3068/ELE\\_U1\\_T2/24\\_resistencia\\_elctrica\\_de\\_un\\_conductor.html](http://redesformacion.jccm.es/aula_abierta/contenido/97/387/3068/ELE_U1_T2/24_resistencia_elctrica_de_un_conductor.html)
- [9] Gabriela/Mediciones. “Sensores resistivos” Consultado el 30 de marzo de 2011. URL: <http://gabrielamorales.wordpress.com/sensores-resistivos/>
- [10] Fundación Educativa Héctor A. García. Ley de Hooke. Elasticidad y resostes. Ley de fuerzas de resortes. URL: [http://www.proyectosalohogar.com/Enciclopedia\\_Ilustrada/Ciencias/Ley\\_de\\_Hooke.htm](http://www.proyectosalohogar.com/Enciclopedia_Ilustrada/Ciencias/Ley_de_Hooke.htm)
- [11] Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad Politécnica de Cartagena. “Sensores basados en efectos resistivos”. URL: <http://www.dte.upct.es/personal/jsuardiaz/docencia/Sensores/Downloads/Transparencias/Tema%203.pdf>
- [12] Laboratorio de Sensores e Instrumentación Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba. LabSen. “Sensores resistivos”.URL: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Tutorial/TECNO2.pdf>
- [13] Foros de electrónica. Load Cell (Celdas de Carga), Principios básicos. URL: <http://www.forosdeelectronica.com/f16/load-cell-celdas-carga-principios-basicos-26/>
- [14] Foil strain gauges and accessories. URL: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0077/0900766b80077de6.pdf>

- [15] RS. Galga extensométricas aluminio, 8mm azul. URL: <http://es.rs-online.com/web/search/searchBrowseAction.html?method=retrieveTfg&Ne=4294958129&N=4294921560+4294954565>
- [16] Real Decreto 2661/1998, de 11-Dic, del Ministerio de Fomento. B.O.E.: 13-ENE-99. "Instrucción de Hormigón Estructural. EHE".
- [17] Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza. Prácticas de Laboratorio. "Elasticidad y Resistencias de Materiales". URL: <http://ingmecanica.unizar.es/estructuras/Asignaturas/EyRM/PracticasLabo0910.pdf>
- [18] National Instruments. "Acondicionamiento para Señales de Galgas Extensométricas" URL: <http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/D0C6F7423F646D1B86256F34007C71A2>
- [19] Oocities.org. "Amplificadores Operacionales". URL: [http://www.oocities.org/iel\\_115/archivos/capitulo1.pdf](http://www.oocities.org/iel_115/archivos/capitulo1.pdf)
- [20] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicación. Universidad de Cantabria. "Instrumentación Electrónica de Comunicaciones. El amplificador de instrumentación". URL: [http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion\\_5\\_IT/IEC\\_3.pdf](http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/IEC_3.pdf)
- [21] Universidad de Sevilla. Departamento de tecnología Electrónica. "Tema 2: Amplificadores de Instrumentación". URL: [http://www.dte.us.es/ing\\_inf/ins\\_elec/temario/Tema%202.%20Amplificadores%20de%20Instrumentacion.pdf](http://www.dte.us.es/ing_inf/ins_elec/temario/Tema%202.%20Amplificadores%20de%20Instrumentacion.pdf)
- [22] Universidad de Burgos. Área de Tecnología Electrónica. Moreno Velasco, Ignacio. Versión 7.0. "Tema 4: Instrumentación Electrónica". URL: [http://www2.ubu.es/ingelec/tecelec/inaki/Instelec/docsinstrum/Apuntes/4-Amplificacion\\_v7-0PW.pdf](http://www2.ubu.es/ingelec/tecelec/inaki/Instelec/docsinstrum/Apuntes/4-Amplificacion_v7-0PW.pdf)
- [23] El rincón del vago. "Amplificadores operacionales" URL: [http://html.rincondelvago.com/amplificadores-operacionales\\_4.html](http://html.rincondelvago.com/amplificadores-operacionales_4.html)
- [24] Monografias.com. "Teoría básica y problemas propuestos de circuitos eléctricos de corriente continua". URL: <http://www.monografias.com/trabajos34/circuitos-electricos/circuitos-electricos.shtml>
- [25] Electrónica Unicrom. "El amplificador operacional. Comparador con amplificador operacional". URL: [http://www.unicrom.com/tut\\_comparadores.asp](http://www.unicrom.com/tut_comparadores.asp)
- [26] El rincón del vago. "Montaje de un sistema de alarma contra ladrones". URL: <http://html.rincondelvago.com/montaje-de-un-sistema-de-alarma-contra-ladrones.html>
- [27] Textos Científicos.com. "Teoría de bandas". URL: <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-metales/teoria-bandas>
- [28] Gómez González aka EagleMan, Ricardo. ricardo at eagleman dot. Versión 0.1 (30 sep 2002). "Los Diodos Led". URL: [http://www.learobotics.com/personal/ricardo/articulos/diodos\\_led/index.html#bandas](http://www.learobotics.com/personal/ricardo/articulos/diodos_led/index.html#bandas)
- [29] Instituto de tecnologías educativas. "Optoelectrónica" URL: <http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/opto1.htm>
- [30] Transistores. URL: <http://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/transistores.pdf>
- [31] Gobierno de Canarias. "El relé" URL: <http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/3/Usrn/fisica/Recursos/flash2/rele.swf>

- [32] Electricidad. "Prueba de lámparas". URL:  
<http://electricidad-viatger.blogspot.com/2009/05/prueba-de-lamparas.html>
- [33] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. "Señales acústicas de peligro y alarma". URL:  
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Rev\\_INSHT/2003/23/fp\\_rev\\_23.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Rev_INSHT/2003/23/fp_rev_23.pdf)
- [34] Técnicas de CAD. Tema1. URL:  
<http://www.futureworkss.com/tecnologicos/electronica/manuales/Glosario%20de%20terminos%20de%20ORCAD.pdf>
- [35] Wikipedia. "La enciclopedia libre". URL:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa\\_de\\_agujeros\\_pasantes](http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa_de_agujeros_pasantes)



## ANEXOS

Burr-Brown Products  
from Texas Instruments

**INA326**  
**INA327**



SBOS222B – NOVEMBER 2001 – REVISED AUGUST 2002

### Precision, Rail-to-Rail I/O INSTRUMENTATION AMPLIFIER

#### FEATURES

- **PRECISION**  
LOW OFFSET: 100 $\mu$ V (max)  
LOW OFFSET DRIFT: 0.4 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C (max)  
EXCELLENT LONG-TERM STABILITY  
VERY-LOW 1/f NOISE
- **TRUE RAIL-TO-RAIL I/O**  
INPUT COMMON-MODE RANGE:  
20mV Below Negative Rail to 100mV Above Positive Rail  
WIDE OUTPUT SWING: Within 10mV of Rails  
SUPPLY RANGE: Single +2.7V to +5.5V
- **SMALL SIZE**  
*micro*PACKAGE: MSOP-8, MSOP-10
- **LOW COST**

#### APPLICATIONS

- LOW-LEVEL TRANSDUCER AMPLIFIER FOR BRIDGES, LOAD CELLS, THERMOCOUPLES
- WIDE DYNAMIC RANGE SENSOR MEASUREMENTS
- HIGH-RESOLUTION TEST SYSTEMS
- WEIGH SCALES
- MULTI-CHANNEL DATA ACQUISITION SYSTEMS
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- GENERAL-PURPOSE

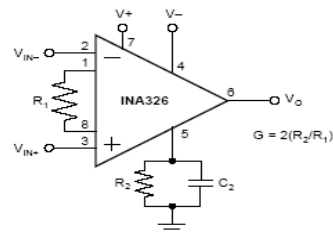
#### DESCRIPTION

The INA326 and INA327 (with shutdown) are high-performance, low-cost, precision instrumentation amplifiers with rail-to-rail input and output. They are true single-supply instrumentation amplifiers with very low DC errors and input common-mode ranges that extends beyond the positive and negative rails. These features make them suitable for applications ranging from general-purpose to high-accuracy.

Excellent long-term stability and very low 1/f noise assure low offset voltage and drift throughout the life of the product. The INA326 (without shutdown) comes in the MSOP-8 package. The INA327 (with shutdown) is offered in an MSOP-10 package. Both are specified over the industrial temperature range,  $-40^{\circ}$ C to  $+85^{\circ}$ C, with operation from  $-40^{\circ}$ C to  $+125^{\circ}$ C.

#### INA326 AND INA327 RELATED PRODUCTS

PRODUCT	FEATURES
INA337	Precision, 0.4 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Drift, Specified $-40^{\circ}$ C to $+125^{\circ}$ C
INA114	50 $\mu$ V $V_{OS}$ , 0.5nA $I_B$ , 115dB CMR, 3mA $I_Q$ , 0.25 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Drift
INA118	50 $\mu$ V $V_{OS}$ , 1nA $I_B$ , 120dB CMR, 385 $\mu$ A $I_Q$ , 0.5 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Drift
INA122	250 $\mu$ V $V_{OS}$ , $-10$ nA $I_B$ , 85 $\mu$ A $I_Q$ , Rail-to-Rail Output, 3 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Drift
INA128	50 $\mu$ V $V_{OS}$ , 2nA $I_B$ , 125dB CMR, 750 $\mu$ A $I_Q$ , 0.5 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Drift
INA321	500 $\mu$ V $V_{OS}$ , 0.5pA $I_B$ , 94dB CMRR, 60 $\mu$ A $I_Q$ , Rail-to-Rail Output



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

TEXAS  
INSTRUMENTS  
www.ti.com

Copyright © 2001, Texas Instruments Incorporated

### PACKAGE/ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE-LEAD	PACKAGE DESIGNATOR <sup>(1)</sup>	SPECIFIED TEMPERATURE RANGE	PACKAGE MARKING	ORDERING NUMBER	TRANSPORT MEDIA, QUANTITY
INA326 "	MSOP-8 "	DGK "	-40°C to +85°C "	B26 "	INA326EA/250 INA326EA/2K5	Tape and Reel, 250 Tape and Reel, 2500
INA327 "	MSOP-10 "	DGS "	-40°C to +85°C "	B27 "	INA327EA/250 INA327EA/2K5	Tape and Reel, 250 Tape and Reel, 2500

NOTE: (1) For the most current specifications and package information, refer to our web site at [www.ti.com](http://www.ti.com).

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>(1)</sup>

Supply Voltage .....	+5.5V
Signal Input Terminals: Voltage <sup>(2)</sup> .....	-0.5V to (V+) + 0.5V
Current <sup>(2)</sup> .....	±10mA
Output Short-Circuit .....	Continuous
Operating Temperature Range .....	-40°C to +125°C
Storage Temperature Range .....	-85°C to +150°C
Junction Temperature .....	+150°C
Lead Temperature (soldering, 10s) .....	+300°C

NOTES: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those specified is not implied. (2) Input terminals are diode clamped to the power-supply rails. Input signals that can swing more than 0.5V beyond the supply rails should be current limited to 10mA or less.

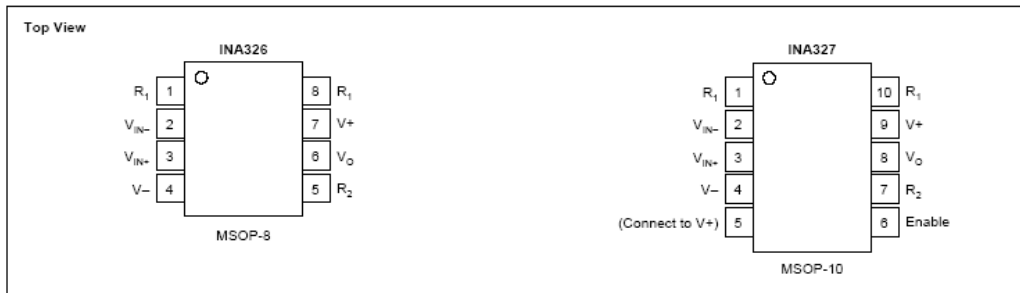


### ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

### PIN CONFIGURATION



## APPLICATIONS INFORMATION

Figure 1 shows the basic connections required for operation of the INA326. A 0.1µF capacitor, placed close to and across the power-supply pins is strongly recommended for highest accuracy.  $R_oC_o$  is an output filter that minimizes auto-correction circuitry noise. This output filter may also serve as an anti-aliasing filter ahead of an Analog-to-Digital (A/D) converter. It is also optional based on desired precision.

The output reference terminal is taken at the low side of  $R_2$  ( $I_{A\_COMMON}$ ).

The INA326 uses a unique internal topology to achieve excellent Common-Mode Rejection (CMR). Unlike conventional instrumentation amplifiers, CMR is not affected by resistance in the reference connections or sockets. See "Inside the INA326" for further detail. To achieve best high-frequency CMR, minimize capacitance on pins 1 and 8.

## SETTING THE GAIN

The INA326 is a 2-stage amplifier with each stage gain set by  $R_1$  and  $R_2$ , respectively (see Figure 5, "Inside the INA326", for details). Overall gain is described by the equation:

$$G = 2 \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

The stability and temperature drift of the external gain-setting resistors will affect gain by an amount that can be directly inferred from the gain equation (1).

Resistor values for commonly used gains are shown in Figure 1. Gain-set resistor values for best performance are different for +5V single-supply and for ±2.5V dual-supply operation. Optimum value for  $R_1$  can be calculated by:

$$R_1 = V_{IN\_MAX} / 12.5\mu A \quad (2)$$

where  $R_1$  must be no less than 2kΩ.

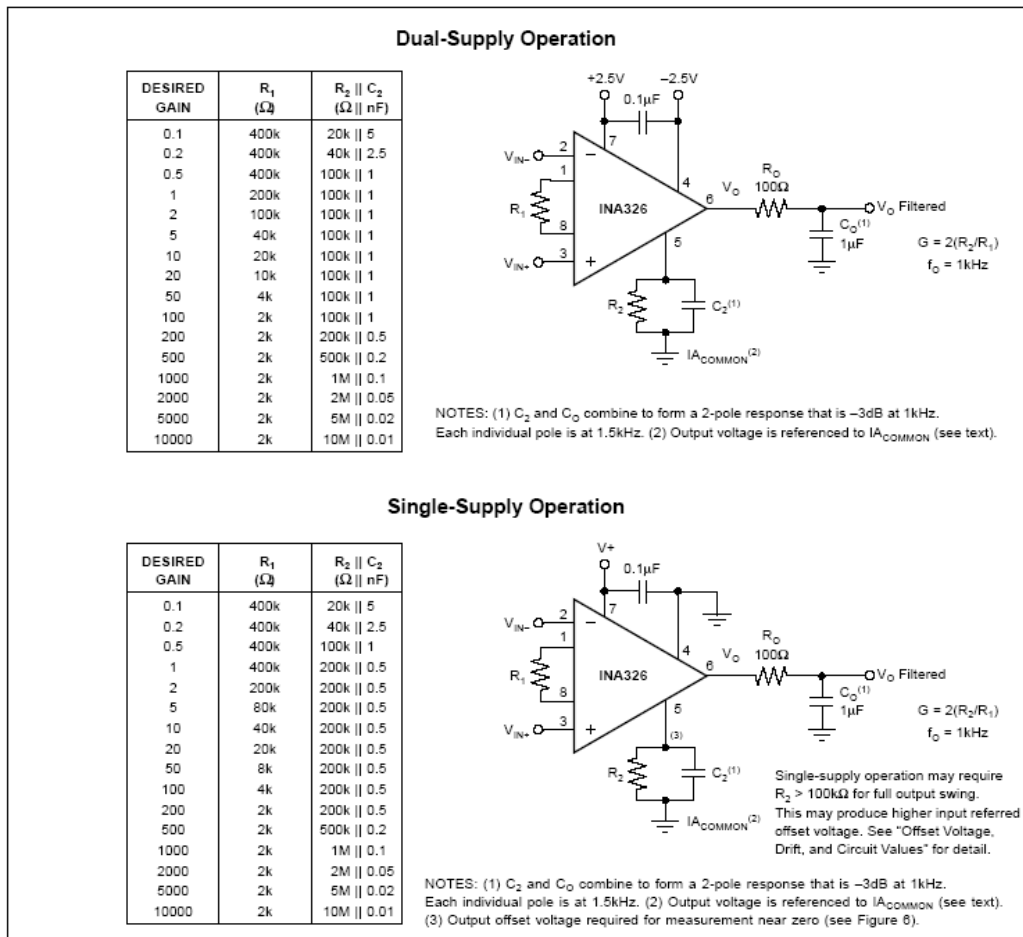


FIGURE 1. Basic Connections. NOTE: Connections for INA327 differ—see Pin Configuration for detail.