

Sensores

Apuntes y prácticas de
sensores

junio 09
versión 1.5

© 2008, 2009 Jorge Rodríguez Araújo

grrodri@gmail.com



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) por la que se da permiso para copiar, distribuir y/o modificar este documento bajo los términos de dicha licencia.

Índice

1. Introducción.....	1
2. Sensores internos.....	2
2.1 <i>Sensores de presencia</i>	2
<i>Fines de carrera mecánicos</i>	2
<i>Relés reed</i>	2
<i>Efecto Hall</i>	2
<i>Magnetoresistivos</i>	2
<i>Inductivos</i>	3
<i>Capacitivos</i>	3
<i>Optoelectrónicos</i>	3
2.2 <i>Sensores de posición</i>	4
2.2.1 <i>Desplazamiento angular</i>	4
<i>Codificadores</i>	4
<i>Resolver</i>	5
2.2.2 <i>Desplazamiento lineal</i>	5
<i>LVDT</i>	5
<i>Reglas ópticas</i>	6
<i>Reglas magnéticas</i>	6
<i>Magnetostrictivos</i>	6
2.2.3 <i>Sensores de velocidad</i>	6
2.2.4 <i>Sensores de fuerza</i>	6
2.2.5 <i>Acelerómetros</i>	7
2.2.6 <i>Sensores de velocidad angular</i>	8
<i>Giroscopio electrónico</i>	8
<i>Giroscopio óptico</i>	8
2.2.7 <i>Sensores de orientación</i>	8
<i>Compás magnético</i>	8
<i>Válvula magnética</i>	9
<i>Flux gate</i>	9
3. Sensores externos.....	10
3.1 <i>Sensores de distancia</i>	10
3.1.1 <i>Técnicas de medición de distancia</i>	10
<i>Distancia por triangulación</i>	10
<i>Distancia por tiempo de vuelo</i>	10
<i>Distancia por desplazamiento de fase</i>	10
3.1.2 <i>Tipos de sensores</i>	11
<i>Sensores de ultrasonidos</i>	11
<i>Sensores de infrarrojos</i>	11
<i>Láser</i>	11
<i>Radar</i>	12

3.2	<i>Técnicas de posicionamiento relativo</i>	12
3.2.1	Odometría.....	12
3.2.2	Técnicas inerciales.....	13
3.3	<i>Técnicas de posicionamiento absoluto</i>	13
3.3.1	Posicionamiento basado en marcas.....	13
	<i>Triangulación</i>	13
	<i>Trilateración</i>	13
3.4	<i>GPS</i>	14
	<i>GPS diferencial</i>	14
3.5	<i>Sensores en microbots</i>	15
	<i>Sensor de presencia</i>	15
	<i>Sensor de distancia</i>	15
4.	Sensores de Temperatura	17
4.1	<i>Termorresistivos</i>	17
4.1.1	Metálicos.....	17
4.1.2	Semiconductores.....	17
	<i>Termistores</i>	17
	<i>Positancias</i>	18
	<i>Sensores de silicio</i>	18
4.2	<i>Termopares</i>	18
5.	Otros	20
5.1	<i>Sensor LDR</i>	20
6.	Características de los sensores	21
	<i>Fiabilidad</i>	22
	<i>Confiabilidad</i>	22
6.1	<i>Modelo metrológico de la diana</i>	22
6.2	<i>Tipos de salidas</i>	22
6.2.1	Salidas digitales.....	22
	<i>Digital tipo relé</i>	23
	<i>Digital de estado sólido</i>	23
6.2.2	Salidas analógicas.....	24
7.	Medida de temperatura con PT100	25
7.1	<i>Introducción</i>	25
7.2	<i>Acondicionamiento</i>	25
7.2.1	Circuito de polarización y puente de medida.....	26
7.2.2	Etapa de amplificación.....	27
7.2.3	Etapa de filtrado.....	29
	<i>Alternativa</i>	30
7.3	<i>Adquisición de datos</i>	31

7.3.1	Temperatura.....	31
	<i>Panel frontal</i>	31
	<i>Diagrama de Bloques</i>	32
8.	Anexo.....	33
8.1	<i>Análisis de un filtro activo</i>	33
8.1.1	Circuito.....	33
8.1.2	Identificación y análisis.....	33
8.1.3	Montaje y comprobación práctica.....	33
8.1.4	Valores teóricos de los condensadores.....	34
8.2	<i>Diseño de un filtro activo</i>	35
8.2.1	Elección de la aproximación.....	35
8.2.2	Cálculo del orden del filtro.....	35
8.2.3	Obtención de la función de transferencia.....	35
8.2.4	Transformación del filtro a nuestras especificaciones.....	35
8.2.5	Elección de la topología.....	36
8.2.6	Calculo de valores de montaje.....	36
8.3	<i>Aislamiento galvánico</i>	36
8.3.1	Introducción.....	36
8.3.2	Aislamiento óptico.....	36
8.3.3	Aislamiento óptico de señales digitales.....	37
	<i>Circuito</i>	37
	<i>Cálculo de R1</i>	37
	<i>Cálculo de R2</i>	38
	<i>Mediciones sobre el circuito</i>	38
	<i>Modificación del circuito para que las señales de entrada y salida estén en fase</i>	38
8.3.4	Aislamiento óptico de señales analógicas.....	38
	<i>Circuito sin realimentación</i>	38
	<i>Cálculo de R1</i>	39
	<i>Representación de $IP2(Vin)$ para $K2=0,007$</i>	39
	<i>Cálculo de R2</i>	40
	<i>Circuito realimentado</i>	40
	<i>Cálculo de R3</i>	40
	<i>Cálculo de R2</i>	41

1. Introducción

Un sensor es un dispositivo que convierte una variable física que se desea medir en una señal eléctrica que contiene la información correspondiente, ya sea modulada en tensión, corriente o frecuencia.

Para ello el sensor suele ir acoplado a un circuito acondicionador de señal, que convierte la señal del sensor a valores adecuados para que dicha señal se pueda procesar, registrar o presentar. En general, este circuito electrónico amplifica, filtra, adapta impedancias, y modula o demodula la señal.

Siguiendo un criterio de clasificación típico de robótica, los sensores se dividen entre propioceptivos, sensores internos dado que permiten conocer el estado del robot, y perceptivos, sensores externos dado que permiten detectar y reconocer el entorno.

2. Sensores internos

2.1 Sensores de presencia

Fines de carrera mecánicos

Son dispositivos de conmutación mecánica que permiten detectar la presencia por contacto. Por lo tanto, resultan económicos, pero presentan mantenimiento y desgaste.

Relés reed

El relé Reed es un conmutador accionado por la proximidad de un campo magnético.

Está formado por dos láminas ferromagnéticas de baja reluctancia encerradas en una ampolla de vidrio. Si su configuración es normalmente abierto, cuando se encuentra ante la presencia de un flujo magnético externo las láminas adquieren polaridades opuestas, se atraen y el interruptor toma un estado de baja impedancia (ON), mientras que en configuración normalmente cerrado, ante la presencia de un campo magnético externo las láminas metálicas adquirirán polaridades iguales, repeliéndose, y pasando el interruptor al estado de alta impedancia (OFF).

Efecto Hall

Son sensores que se basan en el efecto conocido como efecto Hall, donde cuando una corriente de intensidad I circula por una barra de material semiconductor en presencia de un campo magnético transversal (B), se genera una tensión transversal proporcional, dado que los portadores de carga móviles son arrastrados en la dirección perpendicular provocando la aparición de distribuciones de carga de signos opuestos en los laterales de la barra. A este voltaje proporcional al campo magnético se lo conoce como tensión Hall.

Magnetoresistivos

Se basan en una propiedad conocida como magnetorresistencia, por la cual, determinados materiales aumentan su resistencia cuando se encuentran bajo los efectos de un campo magnético externo. Esto se debe a la desviación de la trayectoria de los electrones que provoca la presencia de ese campo, siendo un efecto destacable en los materiales ferromagnéticos.

Se utilizan en la medida de pequeños desplazamientos angulares y lineales, como en el caso de los potenciómetros magnetoresistivos, en los que un imán que funciona como cursor y que se desplaza sobre la magnetorresistencia provoca variaciones de resistividad que permiten la medición del desplazamiento.

También se utilizan para la medición de la corriente que atraviesa un conductor, como en los interruptores que detectan cortes de corriente en circuitos electrónicos.

Inductivos

Se emplean en la detección sin contacto de objetos metálicos a pequeñas distancias, siendo esta de aproximadamente el diámetro de la bobina sensora, aunque depende del material (mayor cuanto más resistivo sea el material) y la forma.

El dispositivo genera un campo magnético (100 kHz a 1 Mhz) que ante la presencia de un objeto metálico, induce corrientes de Foucault en la superficie del mismo, con lo que se puede detectar la variación de inductancia que provocan esas pérdidas por corrientes inducidas. Esta variación es comparada con un umbral para que se active como sensor todo o nada.

Capacitivos

Se emplean para detectar elementos sin contacto, tanto metálicos como no metálicos, pero a muy pequeña distancia (aproximadamente la mitad del diámetro del sensor, aunque depende del material y la forma).

Para esto, miden la variación de capacidad que provoca la intrusión de un objeto en su entorno. Dado que el objeto varía la permitividad eléctrica del medio, lo que se traduce en una variación del comportamiento dieléctrico del medio, que puede ser detectado por la comparación con un determinado umbral.

También se emplean para la detección de posiciones angulares (receptores de radio) gracias a que permiten detectar cambios de área, para la medición de pequeños desplazamientos mecánicos o para la medida de niveles de líquidos conductores gracias a que detectan variaciones de distancia, y para la medida del nivel de líquidos no conductores por medio de la variación dieléctrica.

Optoelectrónicos

Mediante el empleo de una fotocélula se detecta la luz emitida por la fuente,

Se llaman **corrientes de Foucault** a las corrientes inducidas sobre el volumen de una pieza metálica cuando se encuentra bajo el efecto de un campo magnético variable, ya sea porque la pieza se mueve en un campo magnético fijo, o porque este es variable.

Estas corrientes se traducen en pérdidas por calentamiento debidas al efecto Joule.

Cuando se coloca una pieza de metal en un campo magnético variable con el tiempo $B(t)$, se genera un campo eléctrico que produce un movimiento de las cargas libres en el conductor metálico, generando corrientes, según la expresión:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

detectándose cuando se interrumpe ese flujo. Para evitar interferencias de la iluminación ambiental se emplea luz polarizada.

Se diferencian tres tipos principales de sensores optoelectrónicos:

- **Barrera fotoeléctrica:** el emisor y el receptor se encuentran separados.
- **De reflexión sobre espejo:** el emisor y el receptor se encuentran juntos. La reflexión es directa, por medio de un catadióptrico, que presenta la particularidad de reflejar la luz en la misma dirección en que incide.
- **De reflexión sobre objeto:** también conocidos como de reflexión difusa, dado que el haz de luz es reflejado por el propio objeto. Como la reflexión depende del objeto, los de color blanco serán detectados a mayores distancias que los negros, dado que un objeto más oscuro presenta una mayor absorción.

Además, existen las denominadas **cortinas ópticas**, formadas por una serie de barreras fotoeléctricas, con lo que se detectan la posición y el tamaño del objeto introducido en su interior.

2.2 Sensores de posición

Aunque los potenciómetros fueron muy empleados gracias a su simplicidad y bajo coste han sido relegados debido a sus inconvenientes. La disminución de su vida útil debido al desgaste que provoca la existencia de partes móviles, la producción de ruido eléctrico, y su velocidad de funcionamiento limitada.

2.2.1 Desplazamiento angular

Codificadores

Los codificadores generan señales digitales según la posición en la que se encuentren, pudiendo ser angulares o lineales, y están realizados en diferentes tecnologías, siendo los ópticos los más comunes, pero también existen con codificación magnética y con sensores de efecto Hall como los empleados en automoción.

Un codificador emplea un disco marcado para identificar la posición, pudiendo ser incremental, si la posición se establece de forma relativa (medida de incrementos de posición), o absoluto, si la posición se establece de forma absoluta por medio de un código de posición en el disco.

En los codificadores incrementales se emplean discos con dos pistas concéntricas desfasadas media marca, con lo que se puede determinar el sentido de giro, dado que una señal irá adelantada respecto a la otra según el disco gire a derechas o a izquierdas. También

suelen disponer de una señal de paso por cero, que produce un pulso a cada vuelta.

Mediante la conexión de una de las pistas a la entrada de contaje y la otra a la entrada de selección de cuenta ascendente o descendente de un contador reversible se puede conocer la posición. Pero la configuración anterior presentará errores si el encoder se encuentra variando en torno a una misma posición, de modo que habrá que utilizar decodificadores de cuadratura.

En los encoders ópticos un disco translúcido es marcado con una serie de bandas opacas distribuidas uniformemente que interceptan el paso de la luz de un grupo emisor-receptor de luz, generando de este modo una serie de pulsos al girar el disco en el caso de los incrementales. En los codificadores absolutos se genera un código binario según la posición en que se encuentre en cada instante, mediante n pistas concéntricas que codifican cada posición. En estos últimos, para evitar errores de lectura de posición debido a la transmisión asincrónica de los bits se emplea el código Gray, en el que sólo existe un bit de diferencia entre dos posiciones consecutivas cualesquiera.

Resolver

El resolver permite la medida de la posición angular con una resolución infinita, pero dada su naturaleza analógica, sólo resulta adecuado cuando se requiere dicha precisión.

Está formado por una bobina móvil conectada al eje de giro que actúa como primario al ser excitada por una señal senoidal $V_1 = A \sin \omega t$ que induce sobre dos bobina fijas desfasadas 90° (secundarios), las tensiones $V_A = A \sin \alpha \sin \omega t$ y $V_B = A \cos \alpha \sin \omega t$

, con lo que se tiene que $\frac{V_A}{V_B} = \operatorname{tg} \alpha$ depende del ángulo girado, lo que permite resolver la posición.

2.2.2 Desplazamiento lineal

LVDT

El transformador diferencial de variación lineal (LVDT) se emplea en la medida de distancias muy pequeñas, en las que se requiere gran precisión, elevada sensibilidad y robustez, gracias a la ausencia de rozamiento. Consta de un núcleo ferromagnético unido a un vástago que recibe el movimiento y que se desplaza entre un devanado primario y dos secundarios. Al mover el núcleo, dado que el primario se encuentra alimentado en alterna, la inducción en uno de los secundarios aumenta mientras que en el otro disminuye, siendo las tensiones inducidas proporcionales al desplazamiento del eje.

Este tipo de sensores recibe el nombre de reluctivos por basarse en al variación de la

reluctancia magnética de un circuito transformador.

Reglas ópticas

Funcionan igual que los codificadores ópticos, pero en lugar de un disco utilizan una regla.

Reglas magnéticas

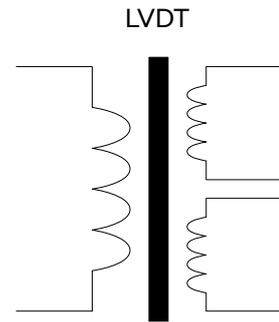
La regla magnética (Inductosyn) presenta una serigrafía en forma de onda rectangular que es alimentada por una señal senoidal y que por tanto inducirá una tensión sobre los seguidores que actuarán como bobinas sensoras, presentando un acoplamiento máximo cuando se encuentre alineado con las pistas de la regleta. Así se pueden contar las variaciones entre acoplamiento máximo y mínimo que se producen según avanza el sensor a lo largo de la regla, y de este modo obtener la posición.

Magnetoestrictivos

Son sensores de desplazamiento lineal que fundamentan su funcionamiento en la magnetoestricción.

El sensor consiste en un imán que se desplaza sobre un vástago provocando la estricción del material en el punto sobre el que se encuentra. Esta singularidad provoca que el sonido, generado por un emisor situado en uno de los extremos del vástago, rebote, de modo que la diferencia de tiempo entre la emisión de la onda y su recepción es proporcional a la distancia hasta el imán, y proporcionará la distancia.

La **magnetoestricción** es la propiedad por la que determinados materiales ferromagnéticos sufren una reducción de sección (estricción) cuando se encuentran sometidos a la acción de un campo magnético (efecto Villari). Esta propiedad se emplea en la generación y detección de ultrasonidos.



2.2.3 Sensores de velocidad

Los sensores de velocidad son poco empleados, dado que lo normal es emplear los sensores de posición para averiguar la velocidad. Los principales son el tacodinamo y el alternador.

2.2.4 Sensores de fuerza

En robótica se emplean los sensores de fuerza para determinar las fuerzas y pares ejercidos sobre el elemento terminal durante la ejecución de una tarea. Aunque también se emplean en la percepción de la forma o posición de un objeto, por medio de la medida de la fuerza ejercida en la superficie de contacto sobre un cierto número de captadores puntuales.

Los principales sensores de fuerza se basan en la piezorresistividad y utilizan para ello las galgas extensiométricas.

Las galgas experimentan una variación de su resistencia eléctrica al sufrir una deformación. Así, al fijarse a un elemento mecánico sobre el que se quiere medir el esfuerzo, miden la deformación que depende de la carga aplicada.

Pueden ser metálicas o semiconductoras, estando las primeras formadas por una lámina de hilo metálico dispuesto en forma de zigzag sobre un soporte elástico, y las segundas por una pista de semiconductor insertada en un núcleo de silicona.

La **piezorresistividad** es la propiedad por la que algunos materiales, conductores y semiconductores, cuando se someten a un esfuerzo que los deforma dentro de su zona elástica, varían su resistencia. Dado que aunque la resistividad (ρ) depende de la temperatura, si se mantiene constante, la resistencia sólo dependerá de los parámetros geométricos del material, y por tanto su variación será debida a la deformación.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Esta propiedad se emplea en la construcción de galgas extensiométricas, que en su montaje industrial se denominan células de carga.

Las galgas metálicas presentan el inconveniente de tener una baja sensibilidad, pero a cambio soportan una gran deformación y son más robustas.

Las semiconductoras, sin embargo, son más sensibles y tienen menor tamaño, pero son más delicadas, su respuesta no es lineal y depende fuertemente de la temperatura.

Debido a que su utilización requiere un montaje y calibración meticulosos, las galgas se encuentran, habitualmente, constituyendo un conjunto integrado en lo que se conoce como células de carga. En ellas, la galga se une a una viga que actuará como elemento sensor, convirtiendo la fuerza o par exterior en una deformación que le es transmitida a la galga que se encuentra fijada en ella, de modo que la salida de la célula proporciona la medida buscada.

Por tratarse de elementos resistivos se montan en puente de Wheastone para compensar los errores debidos a variaciones de temperatura.

2.2.5 Acelerómetros

Los acelerómetros miden la aceleración lineal de un móvil solidario con ellos en un determinado eje del espacio.

El mayor inconveniente que presentan reside en el calibrado, y en el error cometido si se quiere obtener a partir de ellos la velocidad, y mucho más para la posición.

2.2.6 Sensores de velocidad angular

Los sensores de velocidad angular o giroscopios detectan el giro en un eje.

Aunque en un principio eran dispositivos mecánicos, han sido sustituidos por los piezoeléctricos o los ópticos, de los cuales, los láser son los que ofrecen la mayor precisión, y que por tanto son empleados en aplicaciones de mayor responsabilidad, como en aviación.

Una de las características más importantes a tener en cuenta en este tipo de dispositivos es la deriva, dado que con el paso del tiempo pueden falsear enormemente la medida, haciéndola inservible.

Giroscopio electrónico

Los giroscopios electrónicos son dispositivos de estado sólido basados en la aceleración de Coriolis. En ellos, un material piezoeléctrico se hace oscilar a la frecuencia de resonancia, de modo que al girar, la fuerza de Coriolis (proporcional a la velocidad angular) provoca la aparición de una diferencia de potencial debida a la desviación del prisma, permitiendo la medida de la velocidad de rotación.

Giroscopio óptico

El giroscopio óptico está formado por una bobina de fibra óptica por donde se hace circular dos haces láser en sentidos opuestos para generar un patrón de interferencia, siendo el desfase proporcional al desplazamiento angular o giro de la bobina.

Efecto sagnac: Se genera un patrón de interferencia estable mediante dos haces de luz de igual frecuencia y sentidos opuestos al circular por una fibra óptica enrollada. De este modo, al variar la posición del detector se pueden contar las bandas y por tanto determinar la velocidad angular.

Aunque no superan la sensibilidad de los giroscopios de masas (mecánicos), ni la precisión de los basados en láser (ópticos), presentan la ventaja de ser más sencillos, baratos, rápidos (respuesta a altas velocidades de giro) y de menor tamaño y peso.

2.2.7 Sensores de orientación

Los sensores de orientación o compases miden la orientación con relación al polo Norte magnético terrestre.

Compás magnético

El compás magnético, más conocido como brújula magnética, indica la posición del polo Norte geográfico.

Para esto, emplea una aguja magnetizada, que al permitirle girar libremente se alinea

con el campo magnético terrestre, indicando la posición del polo Norte magnéticos. Dado que lo que se quiere es la orientación del polo Norte geográfico, hay que corregir la distancia angular del polo magnético al geográfico, lo que recibe el nombre de declinación. Para esto se sitúa la aguja sobre un círculo graduado en el cual se ha tenido en cuenta la corrección entre nortes.

Válvula magnética

La válvula magnética es un dispositivo electrónico que se emplea para conocer la orientación.

Emplea una barra ferromagnética alrededor de la cual se encuentran enrolladas dos bobinas. Una de las bobinas funciona como conductora (drive) y otra como sensora. Cuando la bobina conductora se encuentra activada, el material está saturado y el campo magnético terrestre no pasa por la barra. Si la bobina conductora actúa de forma alternada, el campo magnético terrestre describe ciclos a través del hierro generando un campo magnético alternante que inducirá una corriente alterna en la bobina sensora, de tal modo que la amplitud de la corriente será mayor cuanto más alineada se encuentre la barra de hierro con el campo magnético terrestre.

Flux gate

El compás tipo "Flux gate" está formado por un toroide ferromagnético alrededor del cual se encuentran enrolladas dos bobina en cruz, de modo que la orientación respecto al campo magnético terrestre provocará una variación del ángulo de desfase existente entre las dos bobinas sensoras.

3. Sensores externos

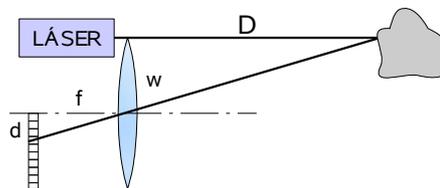
3.1 Sensores de distancia

3.1.1 Técnicas de medición de distancia

Los sensores emplean una serie de técnicas para la medición de la distancia a un objeto.

Distancia por triangulación

El haz reflejado por el objeto es desviado de tal modo que puede ser medido por un array de fotodetectores que permitirá determinar la distancia.



La distancia se obtendrá por semejanza de triángulos, de modo que:

$$\frac{D}{w} = \frac{f}{d}$$

Hay que resaltar que este tipo de medida presenta una exactitud que disminuye con la distancia.

Distancia por tiempo de vuelo

Esta técnica consiste en la medida del tiempo transcurrido entre la emisión de la señal y la recepción de la señal reflejada para determinar la distancia al objeto. Así, la distancia vendrá dada por la expresión:

$$D = \frac{v \cdot t}{2}$$

Distancia por desplazamiento de fase

La medición del desfase (φ) entre la señal emitida y el eco recibido permite la determinación de la distancia al objeto, que será proporcional a este..

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot t}{T} = 2\pi \frac{c}{1} \frac{d}{f} = 4\pi \frac{d}{c} f$$

Como el desfase máximo que proporciona una medida unívoca de distancia es de 180° , el rango de medida depende de la modulación de la señal emitida, de modo que este irá desde unos pocos centímetros hasta varias decenas de metros.

3.1.2 Tipos de sensores

Sensores de ultrasonidos

Los sensores de ultrasonidos emplean un tren de pulsos de ultrasonidos para medir la distancia al objeto por tiempo de vuelo.

El empleo de ultrasonidos provoca que la precisión sea baja, ya sea por las diferentes características de reflexión que presenta cada objeto, o por la variabilidad de la velocidad de propagación del sonido con las condiciones ambientales.

La atenuación del sonido (proporcional al cuadrado de la distancia) limita la distancia de detección a un rango de entre 10 cm y 5 m.

Pueden existir problemas de crosstalk (acoplamiento), dado que se pueden detectar ecos procedentes de otros dispositivos cuando estos se sitúan próximos, ante lo cual, se emplean soluciones en las que se activan de forma alternada aquellos sensores que se sitúan perpendiculares.

Como ventajas ofrecen un bajo precio y consumo.

Sensores de infrarrojos

Los sensores de infrarrojos detectan la presencia de obstáculos mediante la emisión y detección de la luz infrarroja reflejada por el objeto. Debido a que la distancia se mide por la desviación del haz, su alcance se encuentra limitado a unos pocos centímetros. Además, pueden aparecer problemas de interferencias con la luz ambiental, y existe influencia del color y las propiedades reflectivas de la superficie.

Láser

Los sensores láser presentan una elevada precisión y un elevado alcance, aunque existen objetos que resultan indetectables al no presentar reflexión.

En distancias medias miden la distancia por medida de desfase, mientras que en grandes distancias (> 50 m) lo hacen por medida del tiempo de vuelo.

Radar

El radar es un sensor de distancia y velocidad, dado que detecta la distancia por desplazamiento de fase y mide la velocidad por efecto Doppler.

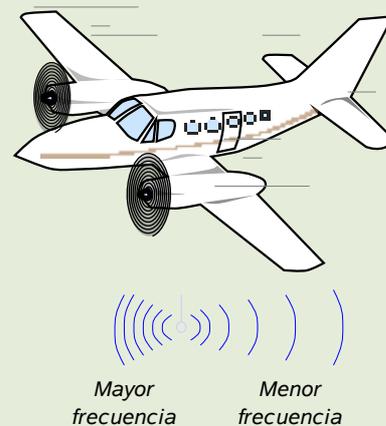
Para ello emite una onda electromagnética modulada en frecuencia, y mediante la medida del desfase entre la señal emitida y la recibida obtiene la distancia, mientras que con la variación de frecuencia obtiene la velocidad relativa del objeto.

La medida de distancia por desplazamiento de fase se realiza teniendo en cuenta que el desfase es proporcional a la distancia a la que se encuentra el objeto.

La medida de velocidad por efecto Doppler responde a la variación de frecuencia que experimenta una onda cuando entre observador y objeto existe una diferencia de velocidad.

Efecto Doppler: Cuando existe un movimiento relativo entre el emisor de ondas y el observador, la frecuencia de la onda observada es diferente de la frecuencia de la onda emitida por la fuente.

$$f_o = \frac{v \pm v_o}{v \pm v_e} f_e$$



3.2 Técnicas de posicionamiento relativo

3.2.1 Odometría

Se llama odometría a la medida relativa de la posición y la orientación del robot a partir de la medida de la rotación de las ruedas, por medio de las ecuaciones cinemáticas.

Como ventajas ofrece precisión y exactitud suficiente en distancias cortas sin necesidad de emplear sistemas externos adicionales.

El inconveniente reside en que el error crece indefinidamente con la distancia recorrida, con lo que si se quiere precisar la localización hay que corregir la estimación con datos del exterior.

Mientras que los errores sistemáticos, aquellos causados por la diferencia entre el robot real y el modelado, son predecibles y por tanto se pueden corregir, los errores no sistemáticos no, dado que están causados por la interacción entre el vehículo y el entorno. Aquí es donde entran las técnicas inerciales.

3.2.2 Técnicas inerciales

Las técnicas inerciales son aquellas en las que la posición y orientación del robot se realiza a partir de sensores que miden la velocidad angular (giroscopios) y la aceleración (acelerómetros).

Como ventajas, ofrecen la independencia de las ecuaciones cinemáticas, con lo que eliminan la aparición de errores sistemáticos y siempre posibilitan la obtención de una estimación.

Pero el inconveniente está en que la necesidad de resolver una integral para la obtención de la posición genera un error acumulativo con el tiempo.

Lo habitual es emplearlas para corregir los errores odométricos graves, dado que si la discrepancia entre la velocidad angular estimada y medida es superior a un determinado valor, prevalece la medida del giroscopio.

3.3 Técnicas de posicionamiento absoluto

3.3.1 Posicionamiento basado en marcas

El posicionamiento basado en marcas emplea una serie de balizas o marcas que se encuentran en lugares fijos y conocidos del entorno para estimar la posición absoluta.

Para la realización de esta estimación de posición se emplean dos métodos fundamentales, la triangulación y la trilateración.

Triangulación

En la triangulación se miden los ángulos entre el eje longitudinal del vehículo y las direcciones de las marcas detectadas.

Así, en navegación se miden los ángulos respecto a la orientación del buque en los que se localiza cada uno de los faros, y una vez localizados tres faros, mediante el trazado de los arcos capaces en la carta desde la localización de los faros se obtiene la posición del buque.

Trilateración

En la trilateración se miden las distancias respecto a tres puntos conocidos, lo que determina una posición unívoca en el espacio.

Por ejemplo, en el Atlántico norte se empleó un sistema llamado LORAN, que mediante la medida del desfase entre las señales de tres estaciones de radio obtenía la posición al conocer las distancias entre el buque y la estación.

3.4 GPS

El sistema de posicionamiento global (GPS), como su propio nombre indica, proporciona la posición de un receptor en el planeta.

Para esto emplea una red de satélites no geostacionarios con los que se determina la posición de un receptor por trilateración.

El posicionamiento en el globo terráqueo requiere la resolución de cuatro variables, la longitud, la latitud, la altitud y el tiempo, para lo cual se requiere que el receptor establezca comunicación con un mínimo de cuatro satélites.

Se necesita conocer el tiempo para establecer la posición de los satélites, que se encuentran sincronizados por medio de relojes atómicos con estaciones en tierra.

La estimación de la distancia entre receptor y satélite se realiza mediante técnicas de medición de tiempo de vuelo, lo que posibilita la localización en tiempo real, dado que cada satélite determina una esfera y la intersección de las esferas, la localización del receptor. Como existe un grado de incertidumbre en la medida de esa distancia, lo que en realidad se tiene es una región donde se encuentra con toda certeza.

Los satélites se comunican con los receptores mediante el empleo de códigos pseudoaleatorios que permiten una identificación unívoca de cada satélite e impiden la utilización indebida (pirateo) del sistema.

Las principales fuentes de error son la refracción y reflexión sufridas al atravesar la atmósfera y la denominada dilución geométrica de la posición, donde debido a la excesiva proximidad de los satélites, se pierde precisión en el posicionamiento.

Existen tres variantes de GPS, el comercial, que presenta la menor precisión, el GPS diferencial, destinado a usos de mayor precisión, y el militar, que puede llegar a una precisión de unos pocos centímetros.

GPS diferencial

En el GPS diferencial se emplean estaciones en tierra para corregir la posición, lo que disminuye el rango de error del sistema hasta menos de un metro.

Las estaciones envían a los receptores la corrección que deben aplicar a la medida de los satélites, pues la posición de dichas estaciones es conocida.

3.5 Sensores en microbots

Dos sensores típicos usados en microbots son el de presencia, para detectar líneas y el de distancia, para detectar choque.

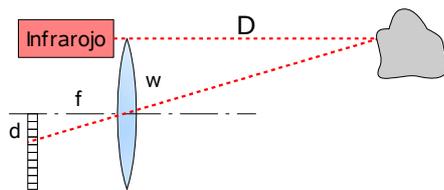
Sensor de presencia

Se trata de un fotodetector, donde un emisor infrarrojo proyecta un haz que al ser reflejado por el objeto es detectado por el receptor que se encuentra al lado.

En este caso la detección de presencia se reduce a no más de un centímetro en el mejor de los casos.

Sensor de distancia

Se trata de un sensor infrarrojo con detección de distancia por triangulación. En el, una banda de fotosensores detectan la desviación del haz que saliendo del sensor es reflejado por un objeto, con lo que la precisión no es uniforme en el rango de medida, siendo inversa de la distancia.

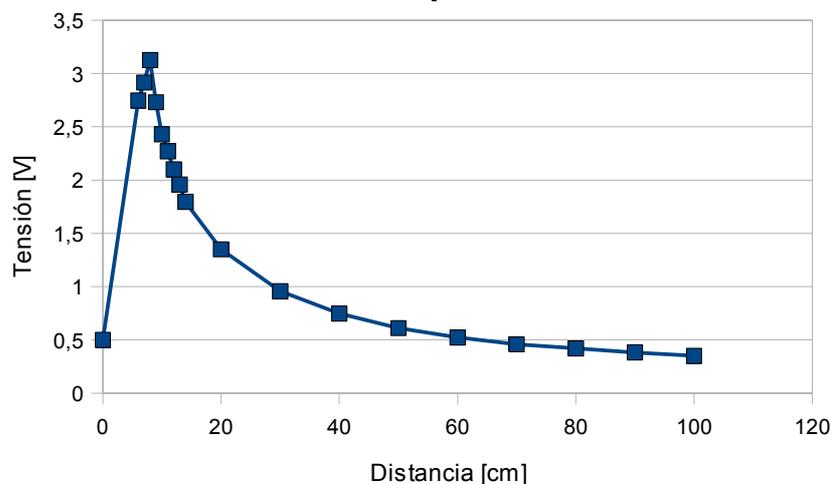


La distancia vendrá dada por semejanza de triángulos.

$$\frac{D}{w} = \frac{f}{d}$$

Este tipo de sensores se emplea en medidas a cortas distancias, dado que en el mejor de los casos su distancia de detección no supera el metro.

Sharp GP2D12



El problema a la hora de realizar una medida de distancia con este sensor reside en la forma de la curva de calibración, pues resulta imposible, sin conocer la evolución histórica de

los valores de distancia, saber si un objeto se encuentra a más o a menos de los 8 cm en torno a los que se encuentra el punto de inflexión. Debido a esto, se suele restringir su rango de uso a un entorno de entre 10 cm y 60 cm.

4. Sensores de Temperatura

4.1 Termorresistivos

Los sensores termorresistivos son aquellos que utilizan la variación de su resistencia eléctrica para medir la temperatura.

4.1.1 Metálicos

Las termorresistencias o resistencias detectoras de temperatura (RTD) están formadas por metales, los cuales, presentan un margen elevado de temperatura con una resistencia que sigue una ley de variación lineal con esta, tal que:

$$R_t = R_o \cdot (1 + \alpha T)$$

El aumento de la temperatura provoca un aumento de la resistencia según el valor de su coeficiente de temperatura (α).

El material del conductor debe tener un coeficiente de temperatura elevado, una resistividad alta y una relación lo más lineal posible entre la resistencia y la temperatura, siendo normalmente, los materiales utilizados, el platino, el níquel y el cobre, y se encapsulan en cerámica dada su alta resistencia a la temperatura.

Como ventajas ofrecen altas temperaturas de operación, y un elevado margen de temperaturas. Buena linealidad en un amplio margen de operación. Mayor intercambiabilidad. Mejor estabilidad a altas temperaturas.

Como inconvenientes ofrecen su baja sensibilidad, su mayor coste y lentitud de respuesta. Además, requieren la conexión de 3 o 4 hilos.

4.1.2 Semiconductores

Los semiconductores poseen una respuesta no lineal con coeficiente de temperatura positivo (PTC) o negativo (NTC) y peor precisión, pero una mayor sensibilidad.

Termistores

Los termistores o NTC (coeficiente de temperatura negativo) se fabrican con óxidos metálicos pulverizados y presentan un coeficiente negativo elevado.

Como ventajas presentan un aumento de la sensibilidad y valores elevados de resistencia, con un menor tiempo de respuesta, y reducido tamaño.

Como inconvenientes están la no linealidad de su comportamiento y el margen estrecho

de temperaturas de funcionamiento. Además, las series de fabricación no son uniformes con lo que su intercambiabilidad es menor y con corrientes grandes presentan un efecto de autocalentamiento.

Se usan principalmente en termómetros de bajo coste, en compensación de temperatura y protección de circuitos electrónicos, en el accionamiento retardado de relés.

Positancias

Las positancias o PTC (coeficiente de temperatura positivo) tienen un elevado coeficiente de temperatura en un margen muy estrecho de temperaturas y se realizan con titanatos de bario y estroncio pulverizado.

Sus principales aplicaciones son en termostatos, alarmas de temperatura, medidas de nivel, pero sobre todo como elemento protector para limitar la corriente y como estabilizador de la misma, realizando la protección térmica de motores y compensando la temperatura en circuitos con transistores.

Sensores de silicio

Los sensores de silicio tienen un coeficiente de temperatura positivo y superior al de los sensores metálicos.

Sus ventajas son su alta resistencia y reducida variación térmica, elevada sensibilidad (mayor que las metálicas), buena intercambiabilidad y sobre todo, bajo coste.

Entre los inconvenientes están el estrecho margen de temperaturas, su peor linealidad, peor precisión, baja estabilidad y respuesta lenta.

Se emplean en termómetros electrónicos digitales y para la compensación de temperatura en circuitos integrados.

4.2 Termopares

Los termopares proporcionan una media diferencial de temperatura, o sea la medida proporcionada es respecto a una temperatura de referencia.

Su funcionamiento se basa en el efecto termoeléctrico, por el que la unión de los extremos de dos metales distintos genera una corriente cuando sus uniones se encuentran a diferente temperatura. Siendo la tensión, proporcional a la diferencia de temperaturas según el efecto Seebeck (combinación del efecto Thompson y Peltier).

Efecto Peltier: es la emisión o absorción de calor que se produce al circular corriente por un circuito formado por dos conductores diferentes unidos entre si. Según la dirección de la

corriente una unión se enfría y la otra se calienta.

Efecto Thompson: es el fenómeno de la absorción o la emisión de calor cuando circula una corriente por un conductor homogéneo que es sometido a un gradiente de temperatura. El calor liberado es proporcional a la corriente, y cambia de signo si cambia el sentido de la corriente.

Efecto Seebeck: es la combinación del efecto Peltier y del efecto Thompson. Cuando dos conductores diferentes se unen en sus extremos y se mantienen estos a distinta temperatura, se genera una corriente continua que aumenta según aumenta la diferencia de temperatura entre las uniones.

5. Otros

5.1 Sensor LDR

El LDR (Light Dependent Resistor) es una fotorresistencia, o sea, una resistencia cuya conductividad aumenta con la intensidad de una radiación incidente.

Cada LDR es sensible a un determinado margen de longitudes de onda. Dado que presentan un elevado tiempo de respuesta (típicamente de 200 ms) es importante tener en cuenta que este varía, acortándose cuanto más grande sea la resistencia de carga, y alargándose con la disminución de la temperatura ambiente y la intensidad de la iluminación, así como con la secuencia histórica, donde aumenta notablemente cuando se ha encontrado a niveles de iluminación bajos.

El tiempo de respuesta a la iluminación depende de la intensidad de iluminación, de la secuencia histórica, de la resistencia de carga y de la temperatura ambiente; siendo menor el tiempo de respuesta según aumentan estas.

6. Características de los sensores

Las principales características a tener en cuenta en la selección de un sensor son:

- **Resolución:** es la mínima variación, dentro del rango de medida, que es apreciada por el sensor como un cambio de su salida.
- **Precisión:** es la tolerancia de la medida, con lo que define los límites del error, garantizando que la medida se encontrará con toda seguridad en el rango definido.
- **Repetibilidad:** es el grado de precisión en la repetición de una medida que se realiza de forma consecutiva y bajo las mismas condiciones, incluida la dirección de variación del estímulo de entrada.
- **Sensibilidad:** indica la variación que experimenta la medición con la variación de la variable medida, o sea, es la razón de cambio de la salida ante los cambios en la entrada, y por tanto es mejor cuanto mayor sea.
- **Exactitud (accuracy):** Diferencia entre la salida real y el valor teórico de dicha salida (valor verdadero). Se suele dar en valor absoluto o relativo.
- **Grado de protección (IP: Internation Protection):** el grado de protección se designa como "IPxy", siendo x (1ª cifra) el indicador del grado de protección contra sólidos [0 (sin protección) - 6 (protección total)], e y (2ª cifra) el indicador del grado de protección contra líquidos [0 (sin protección) - 8 (protección contra la inmersión indefinida)].
- **Rango (range):** Valores entre los cuales se puede realizar una medida. Rango de valores de la magnitud de entrada comprendido entre el máximo y el mínimo detectables por un sensor, con una tolerancia de error aceptable.
- **Deriva:** variación de la salida esperada del sensor debido a cambios de temperatura, humedad, envejecimiento, etc.

Además, todo dispositivo presenta unas condiciones ambientales de operación, fuera de las cuales no se garantiza su funcionamiento, y que en el caso de los sensores, aún con un funcionamiento correcto provocan desviaciones de las medidas que pueden resultar importantes.

Fiabilidad

La fiabilidad establece la probabilidad de que el sistema cumpla su función a lo largo de un tiempo determinado y bajo unas condiciones de trabajo especificadas. Dependiendo de la criticidad del sensor sobre el sistema puede ser determinante en la elección.

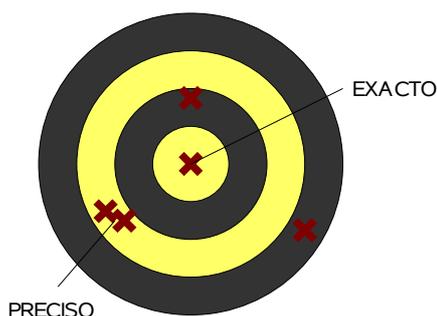
Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que el sensor funcione dentro de sus especificaciones en un instante determinado. Y establecerá el grado de confianza de la medida proporcionada por cada sensor disponible.

6.1 Modelo metrológico de la diana

El modelo metrológico de la diana ilustra la diferencia entre *resolución*, *precisión* y *repetibilidad*.

El centro de la diana representa el valor verdadero, mientras que los círculos representan la resolución, siendo mayor cuanto más pequeño sea el radio.



De este modo, la distancia de un punto al centro de la diana representa la exactitud (accuracy) de la medida, mientras que la distancia entre puntos representa la precisión (precision) o el grado de concordancia entre las medidas, de modo que el error será más pequeño cuanto menor sea la distancia al centro y mayor el agrupamiento de las medidas.

Así, cuando se repite un cierto número de veces la medida de un cierto valor, la media de dichas medidas es el valor que más se acerca al real, dado que según la estadística se trata de un estimador insesgado de media nula.

El error es la diferencia entre el valor verdadero y el valor medido, estando formado por el error de medida y por los errores sistemáticos y aleatorios.

6.2 Tipos de salidas

6.2.1 Salidas digitales

Existen dos tipos de salidas digitales diferenciadas por el dispositivo que emplean en la conmutación, lo que les confiere características eléctricas fuertemente diferenciadas.

Digital tipo relé

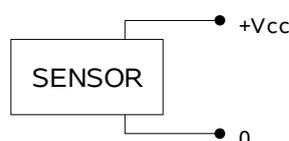
Este tipo de salidas se produce a través de un relé, con lo que se comporta como un interruptor controlado por el sensor.

Digital de estado sólido

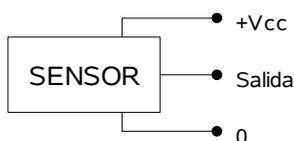
Una salida de estado sólido, al contrario que una de relé electromagnético, no tiene partes mecánicas móviles, sino que utiliza componentes semiconductores lo que le confiere prácticamente un número de operaciones ilimitado. Además se evitan las posibles anomalías que pueden producirse en un contacto mecánico al abrirse o cerrarse, tales como las debidas a los rebotes de los contactos o a las interferencias que produce el arco eléctrico.

Aquí, las salidas típicas se diferencian por el número de hilos:

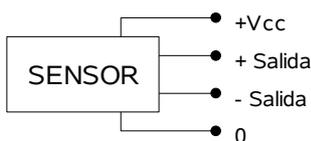
- Salidas a **dos hilos**: los terminales de alimentación y señal coinciden, de modo que dado que la corriente pasa a través de la carga, cuando el sensor está abierto deja pasar una pequeña corriente necesaria para su alimentación, del orden de algunos mA, y del mismo modo cuando el sensor está cerrado mantiene una tensión residual entre sus bornes para alimentarse.



- Salidas a **tres hilos**: dos de los terminales son de alimentación, mientras que el tercero es la señal de salida a la cual se conecta uno de los terminales de carga.

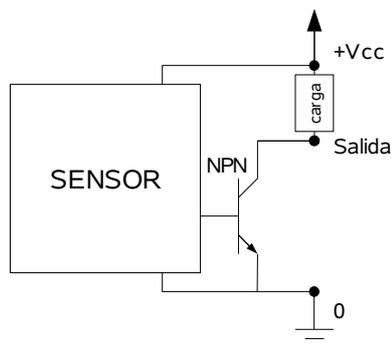


- Salidas a **cuatro hilos**: al igual que en los de tres, dos terminales son de alimentación, y los otros dos proporcionan dos señales de salida, siendo una la inversa de la otra.

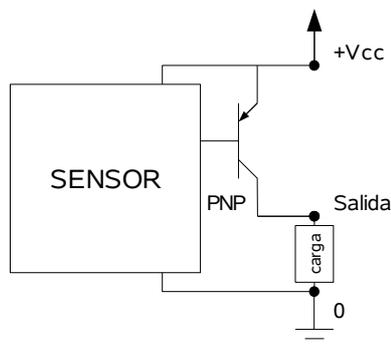


Además, las salidas digitales a tres hilos, las más comunes, se diferencian según el tipo de transistor que utilicen, dado que determina la posición de la carga:

- Tipo NPN: en este tipo de salidas usan un transistor bipolar NPN en conmutación para activar la salida conectando o desconectando la carga al positivo de la alimentación.



- Tipo PNP: al cambiar el transistor de salida por uno PNP, la carga debe ir conectada entre los terminales de salida y negativo de alimentación (referencia).



6.2.2 Salidas analógicas

Las salidas analógicas pueden ser en tensión, en corriente o en frecuencia, teniéndose que:

- La señal de salida se da en forma de nivel de tensión cuando la distancia de transmisión es corta (menor de 10 m), ya que la caída de tensión en los hilos será pequeña y la baja inmunidad al ruido no afectará. Aquí, la impedancia de carga (Z_i) debe ser muy superior a la impedancia de salida del sensor (Z_o).
- La señal de salida se da en forma de corriente cuando la distancia de transmisión es mayor que en el caso anterior, dado que al ser altamente inmune al ruido, admite longitudes de cableado muy superiores a los de salida en tensión. Aquí, al contrario que en el caso anterior, la impedancia de carga debe ser muy inferior a la de la salida.
- La señal de salida se da en forma de frecuencia cuando la inmunidad al ruido resulta crítica.

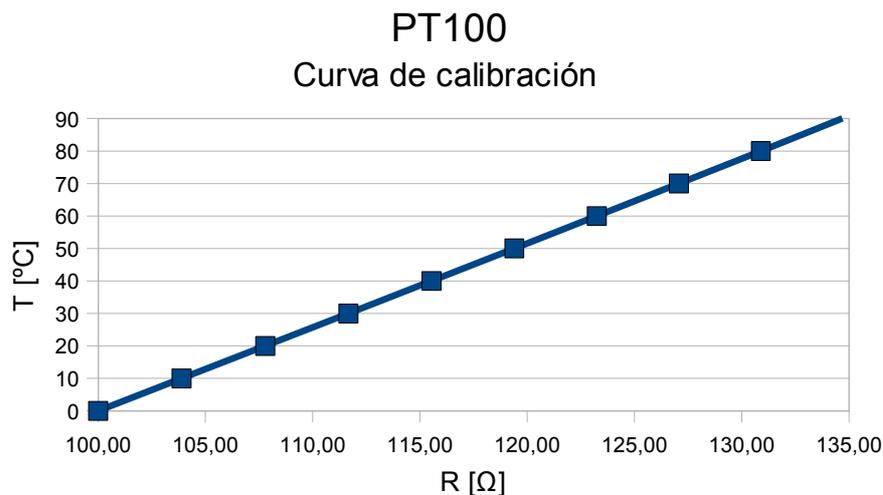
7. Medida de temperatura con PT100

7.1 Introducción

Entre los sensores más usados para la medida de temperaturas próximas a la ambiental destacan a nivel industrial los termopares en medidas diferenciales y las PT100 en absolutas.

Uno de los termopares más común es el tipo J, formado por una unión de hierro-Constantan¹, cuyo rango de medida va de -184 °C a 760 °C.

La PT100 es una resistencia de platino cuyo valor óhmico a 0 °C es de 100 Ω, motivo por el cual se denomina PT100. Se trata de un sensor resistivo de temperatura (RTD) dado que su resistencia experimenta una variación lineal con la temperatura, de tal modo que mientras que a 0 °C vale 100 Ω, a 100 °C vale 138,5 Ω.



$$R = R_0 + \alpha \cdot T$$

$$R_0 = 100 \Omega \quad \alpha = 0,388$$

7.2 Acondicionamiento

Para realizar la medida de la PT100 se sigue el esquema típico de acondicionamiento de un sensor: alimentación, amplificación y filtrado.

Dado que la medida del sensor se produce en forma de variación de resistencia, se emplea para su medida un circuito configurado en puente de Wheastone alimentado por una fuente de intensidad, para de este modo poder medir la variación de resistencia.

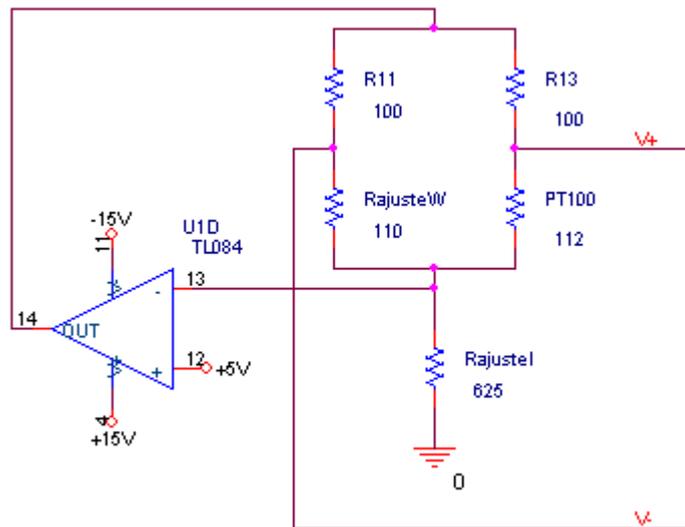
¹ El Constantán es una aleación de cobre y níquel

Para que la variación de medida sea apreciable para la instrumentación se realiza una etapa de amplificación y filtrado, y de este modo adaptar la medida al rango de adquisición de nuestra tarjeta.

Puente de Wheatstone: configuración en puente de elementos resistivos para la medida estable de variaciones de resistencia (sustituyendo a la conexión en divisor de tensión).

7.2.1 Circuito de polarización y puente de medida

Utilizamos una fuente de intensidad en topología de fuente flotante alimentando un puente de Wheastone.



Esquemático 1: Puente de Wheastone alimentado por fuente de intensidad en topología de fuente flotante

La fuente se ajusta a través de Rajustel, y como en nuestro caso la tensión de referencia tomada fue de 5 V y la intensidad con la que queríamos alimentar el puente era de 8 mA tuvo que tener un valor entorno a 625 Ω .

Si analizamos un puente de Wheastone obtenemos que:

$$PT100 = R0(1+x)$$

$$K = \frac{R11}{R13} = \frac{RajusteW}{R0}$$

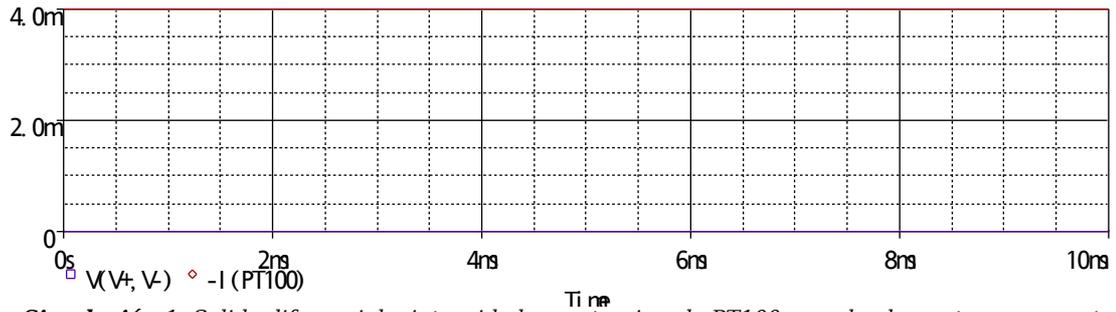
$$Vd = V \frac{K \cdot x}{(K+1)(K+1+x)}$$

y como: $x \ll (K+1)$ y $K=1$ (resistencias iguales)

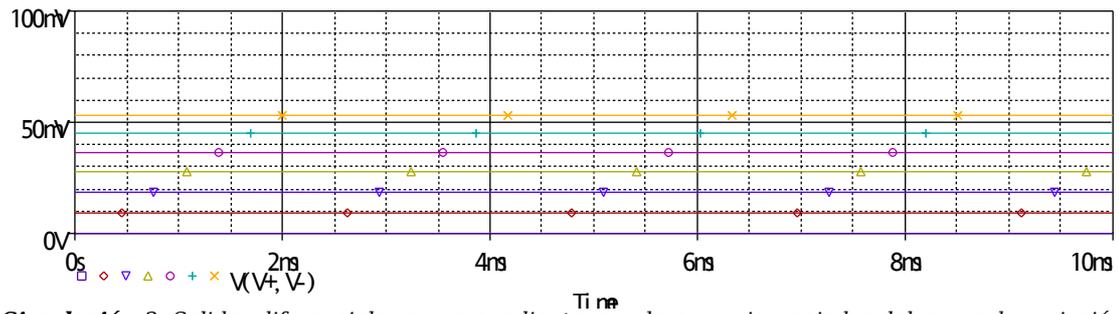
Entonces tenemos una tensión de salida proporcional a los cambios de resistencia, ya que:

$$V_d = \frac{V}{4} \cdot x$$

Simulaciones de nuestro puente de medida hechas mediante ORCAD:



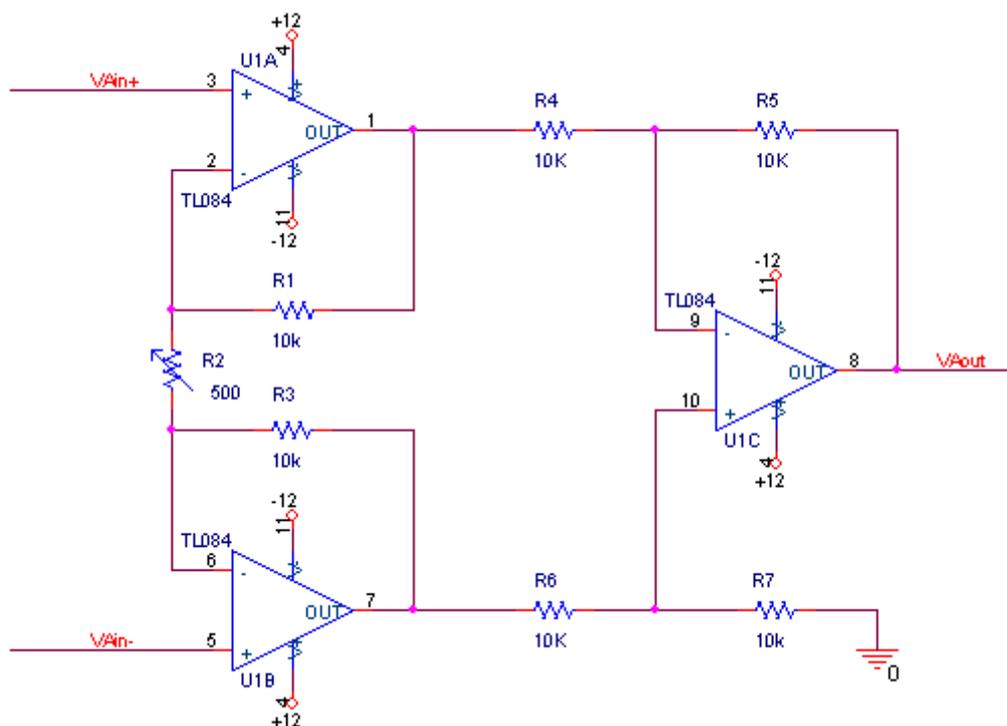
Simulación 1: Salida diferencial e intensidad que atraviesa la PT100 cuando el puente se encuentra compensado



Simulación 2: Salidas diferenciales correspondientes a valores equiespaciados del rango de variación óhmica [110,140]

7.2.2 Etapa de amplificación

Para esta etapa montamos un amplificador de instrumentación de ganancia variable ajustable por medio del potenciómetro R2, tal y como se muestra en el siguiente esquemático.



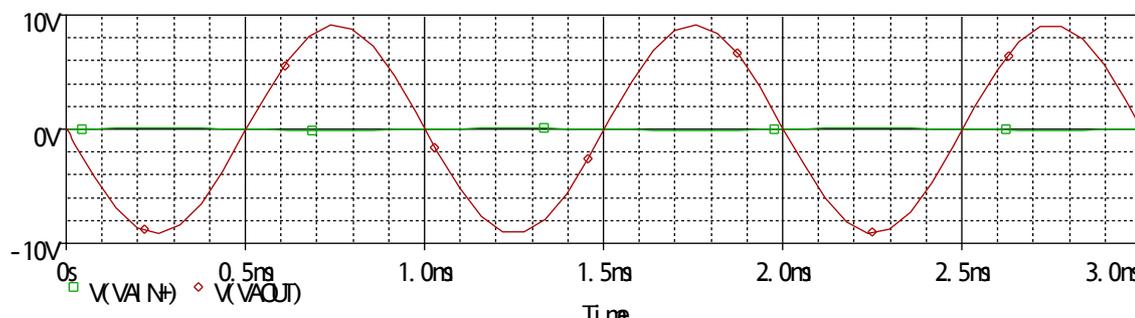
Esquemático 2: Amplificador de instrumentación de ganancia regulable por potenciómetro

Si analizamos este circuito considerando amplificadores operacionales ideales tenemos que la ganancia del mismo, viene dada por la ecuación:

$$G = -\left(1 + \frac{R1 + R3}{R2}\right)$$

Entonces, con este circuito podríamos tener ganancias desde 41 para $R2 = 500 \Omega$, hasta de más de 400. Lo que nos permite trabajar con señales de hasta 250 mV sin sobrepasar los 10 V de salida.

En la figura siguiente podemos ver una simulación del circuito, realizada en ORCAD, en la que se ha tomado una $R2 = 220 \Omega$ y una señal de entrada senoidal de 1 kHz y 100 mV de amplitud.

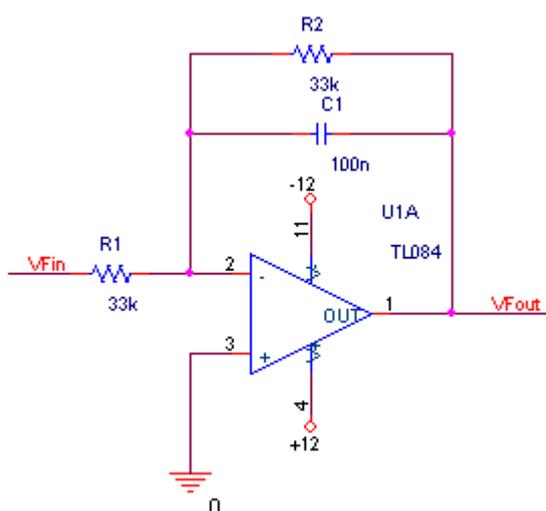


Simulación 3: Señales de entrada y salida de un AI de ganancia $G=92$

7.2.3 Etapa de filtrado

La tarjeta de adquisición de la que disponemos en el laboratorio (NI USB-6008 DAQ) posibilita la captura de una entrada analógica a 10 kS/s, por lo tanto, sabemos por el teorema de muestreo de Nyquist que evitaremos el aliasing con un filtro paso bajo de frecuencia de corte inferior a 5 kHz (filtro Antialiasing para una entrada analógica con esta tarjeta de adquisición).

Para el filtrado de la señal proporcionada por este sensor, optamos por un filtro activo paso bajo de primer orden, con frecuencia de corte de 50 Hz (frecuencia de corte típica para medidas con sensores analógicos)².



Esquemático 3: Filtro activo paso bajo de primer orden y frecuencia de corte 50 Hz

Si analizamos este circuito considerando que el amplificador operacional es ideal tenemos que su función de transferencia viene dada por:

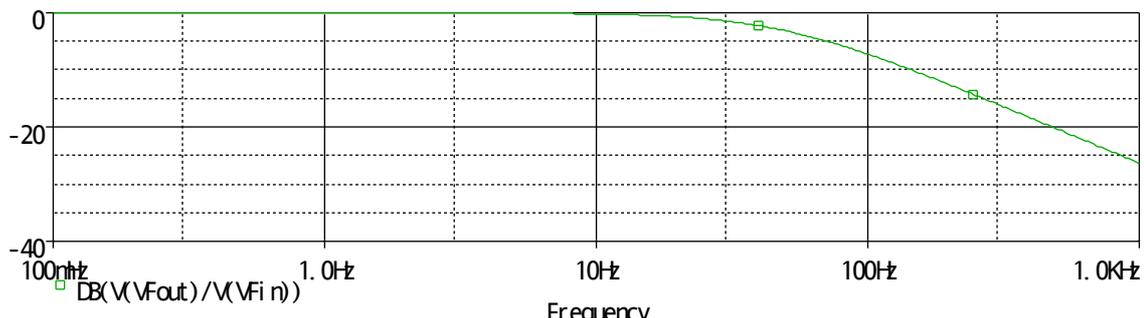
$$G(s) = -\frac{R2}{R1(1 + R2Cs)}$$

Como queremos una ganancia 1, igualamos las resistencias, y como queremos una frecuencia de corte ($|G(s)| = -3 \text{ dB}$) de 50 Hz y disponemos de un condensador de 100 nF, entonces:

$$R = \frac{1}{C2\pi fc} = 31831 \Omega$$

En la figura siguiente podemos ver una simulación del circuito montado, realizada en ORCAD.

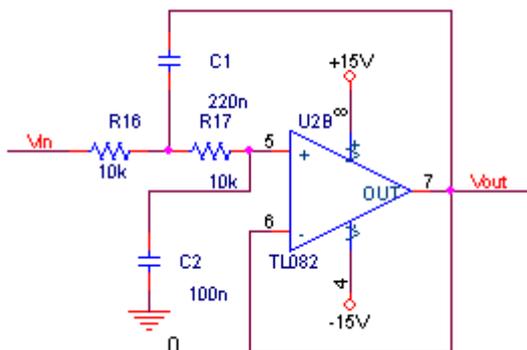
² Permite apreciar variaciones cada 20 ms. Mucho más que suficiente para mediciones de éste tipo.



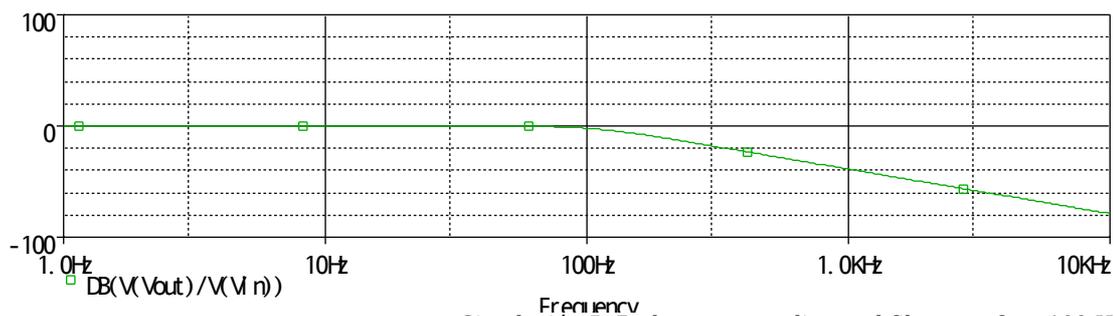
Simulación 4: Diagrama de amplitud de Bode de filtro paso bajo con $f_c = 48$ Hz

Alternativa

Como alternativa se presenta la opción de utilizar un filtro paso bajo de segundo orden, que en este caso presenta una frecuencia de corte de 100 Hz.



Esquemático 4: Filtro activo paso bajo de segundo orden y frecuencia de corte 100 Hz



Simulación 5: Bode correspondiente al filtro con $f_c = 100$ Hz

7.3 Adquisición de datos

7.3.1 Temperatura

Panel frontal

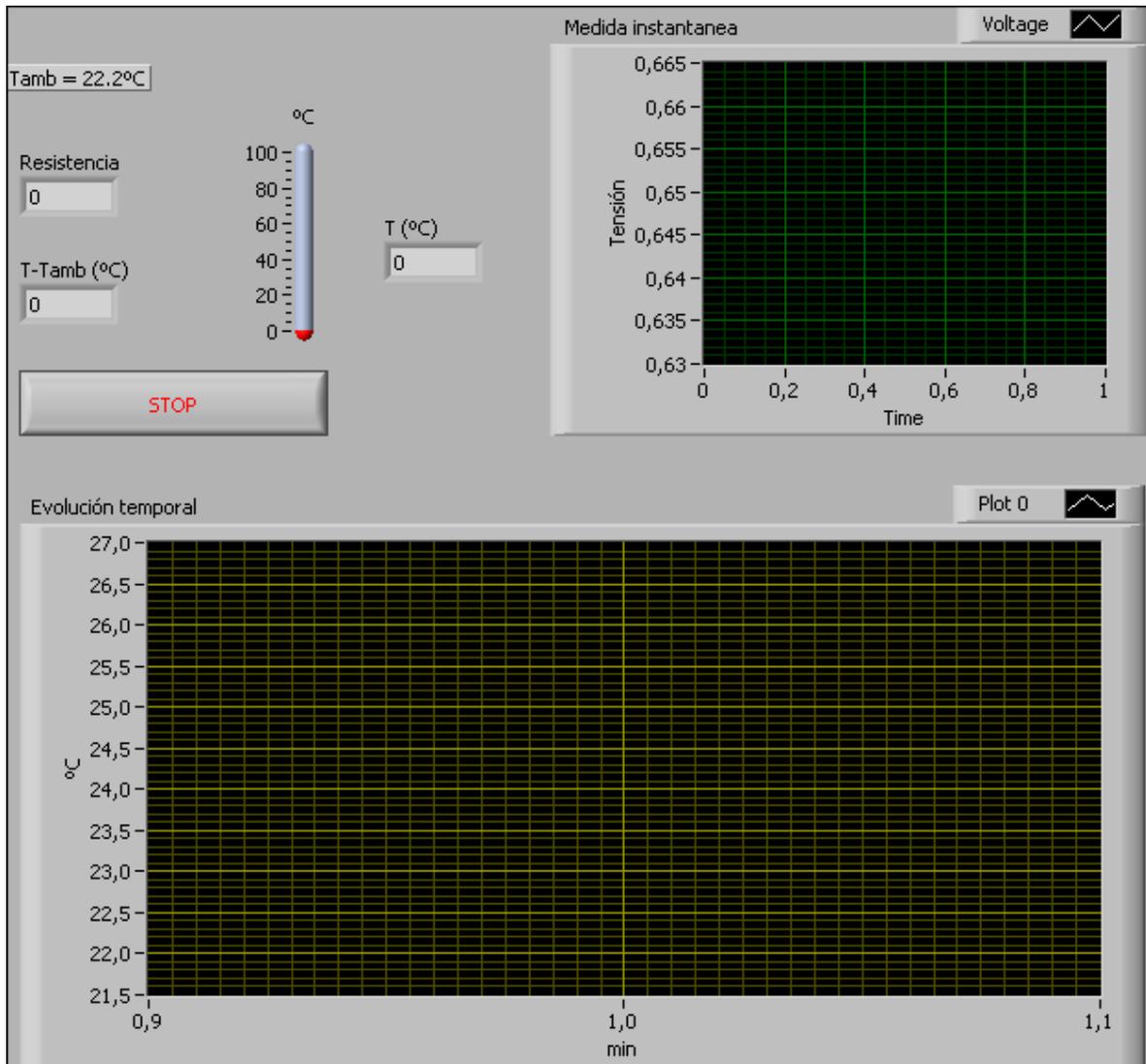
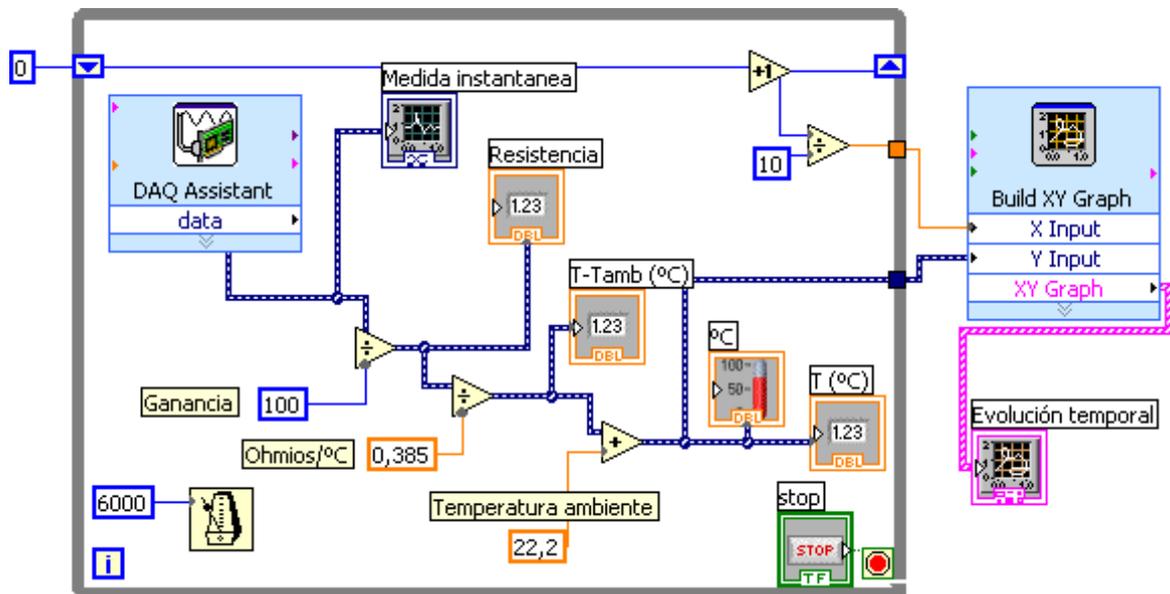


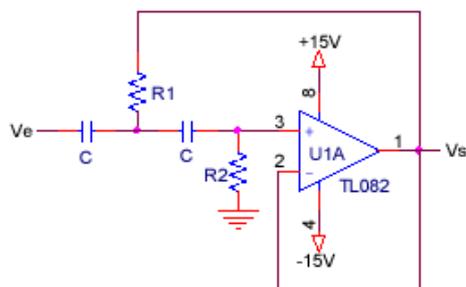
Diagrama de Bloques



8. Anexo

8.1 Análisis de un filtro activo

8.1.1 Circuito



8.1.2 Identificación y análisis

El circuito de la figura presenta una topología de un **filtro activo paso bajo**, basado en una fuente de tensión controlada en tensión (*Sallen-Key*).

Como para este tipo de filtro tenemos la siguiente función de transferencia:

$$F(s) = \frac{1}{R1 R2 C1 C2} \frac{1}{s^2 + \frac{C2 R1 + C2 R2}{R1 R2 C1 C2} s + \frac{1}{R1 R2 C1 C2}}$$

Entonces: $\omega_c^2 = \frac{1}{R1 R2 C1 C2}$ y $\omega_c = \sqrt{\frac{1}{10k \cdot 10k \cdot 220n \cdot 100n}} = 674,20 \text{ rad/s}$

Por tanto la **frecuencia de corte teórica** de este filtro es:

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{674,20}{2 \cdot \pi} = 107,30 \text{ Hz}$$

8.1.3 Montaje y comprobación práctica

Mediante el generador de funciones y el osciloscopio se pudo comprobar el tipo de filtro (frecuencias no atenuadas) y frecuencia de corte práctica (atenuación de 3 dB) para este circuito. Obteniéndose los siguientes resultados:

f (Hz)	V _o (V)
10	5
20	4,9

f (Hz)	V _o (V)
50	4,40
100	3,68
200	3,08
500	2,64
1000	2,56

Como trabajamos con una tensión de entrada $V_e = 5V$ la atenuación de 3 dB se produce a $V_o = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,54V$ valor que obtuvimos a una frecuencia de $f_c = 112 Hz$

Como podemos observar en la tabla, efectivamente se trata de un filtro paso bajo, pues por encima de los 100 Hz se produce una fuerte atenuación de la señal de entrada.

8.1.4 Valores teóricos de los condensadores

Suponiendo una frecuencia de corte de 100 Hz, tenemos que para este filtro la función de transferencia es:

$$F(s) = \frac{454545,45}{s^2 + 909,09s + 454545,45} \quad \text{y} \quad \omega_c = 674,20 \text{ rad/s}$$

Normalizando³ la función de transferencia obtenemos:

$$F(s_{nor}) = \frac{454545,45}{454545,45 s_{nor}^2 + 674,20 \cdot 909,09 s_{nor} + 454545,45} = \frac{1}{s_{nor}^2 + 1,35 s_{nor} + 1}$$

Como ahora nuestra $f_c = 100 Hz$, tenemos que $\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 100 = 628,32 \text{ rad/s}$

Desnormalizando, nos queda:

$$F(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{394786,02} + 1,35 \frac{s}{628,32} + 1} = \frac{394786,02}{s^2 + 848,23s + 394786,02}$$

Ahora, para tomando resistencias de valor 10k, nos dan unos condensadores de valores teóricos:

$$C2 = \frac{848,23}{20000 \cdot 394786,02} = 107,42 \text{ nF}$$

³ $s_{nor} = \frac{s}{\omega_c}$

$$CI = \frac{1}{394786,02 \cdot 10k \cdot 10k \cdot 107,42k} = 235,81 nF$$

8.2 Diseño de un filtro activo

Diseño de un filtro activo paso alto con las siguientes características:

- $A_{max} = 0,5 \text{ dB}$
- $A_{min} = 35 \text{ dB}$ (a 10 Hz)
- $f_c = 225 \text{ Hz}$
- Ganancia en banda pasante plana ($K=1$)

8.2.1 Elección de la aproximación

Como se quiere banda pasante plana debemos tomar la aproximación de Butterworth.

8.2.2 Cálculo del orden del filtro

$$n = \frac{\log \left[\left(10^{\frac{A_{min}}{10}} - 1 \right) / \left(10^{\frac{A_{max}}{10}} - 1 \right) \right]}{2 \cdot \log(\omega_c / \omega_s)}$$

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 225 = 1413,72 \text{ rad/s} \quad \omega_s = 2 \cdot \pi \cdot 10 = 62,83 \text{ rad/s}$$

$$n = 1,64 \approx 2$$

8.2.3 Obtención de la función de transferencia

Como $n=2$ Butterworth nos da los coeficientes $a1 = \sqrt{2}$ y $a2 = 1$. Quedando la función de transferencia de un filtro paso bajo normalizado.

$$F(s_{nor}) = \frac{1}{1 + \sqrt{2} \cdot s_{nor} + s_{nor}^2}$$

8.2.4 Transformación del filtro a nuestras especificaciones

Desnormalizando la función mediante $s_{nor} = \omega_c / s$ (ya que queremos pasar a un filtro paso alto de $\omega_c \neq 1$) obtenemos:

$$F(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1999,30 \cdot s + 1998604,24}$$

8.2.5 Elección de la topología

Se opta por la topología Sallen-Key (fuente de tensión controlada en tensión), que para un filtro paso alto es la correspondiente a la siguiente figura,

y cuya función de transferencia para $K=1$ y $C_1=C_2=C$ es:

$$F(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{2RI}{RI R2 C} s + \frac{1}{RI R2 C^2}}$$

8.2.6 Calculo de valores de montaje

Tomando $C_1=C_2=100\text{ nF}$ calculamos R_1 y R_2 , obteniendo:

$$R_1 = 5001,74 = 5\text{k} \quad \text{y} \quad R_2 = 10003,50 = 10\text{k}$$

8.3 Aislamiento galvánico

8.3.1 Introducción

A la hora de realizar el aislamiento eléctrico entre dos etapas, mejor dicho, aislamiento galvánico entre dos etapas de un circuito, se busca garantizar un determinado nivel de tensión para el cual no existe ruptura dieléctrica entre emisor y receptor. Para este fin se diferencian tres alternativas básicas que resuelven el acoplamiento:

- Por transformador de aislamiento
- Por acoplamiento óptico
- Por acoplamiento capacitivo

8.3.2 Aislamiento óptico

Aunque los optoacopladores presentan una respuesta en frecuencia limitada, y su respuesta no es lineal presentan innumerables ventajas que los hacen ser una de las opciones preferentes en sistemas digitales.

Los parámetros característicos fundamentales son:

- La relación de transferencia de corriente (CTR: Current Transfer Ratio): no es constante dado que el fotoemisor no es lineal y la ganancia del fototransistor es función de I_L .

$$CTR = \frac{I_L}{I_F} \quad ()$$

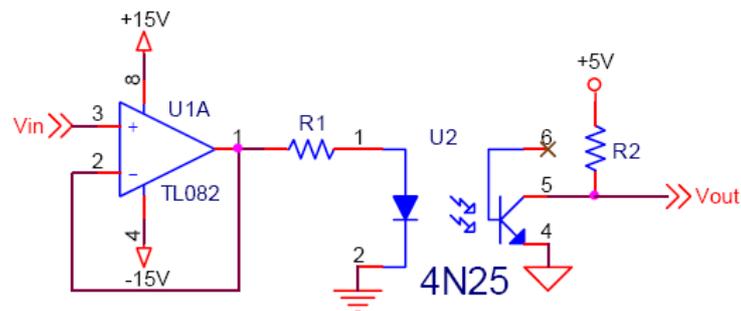
- Razón de rechazo en modo común (CMRR: Common Mode Rejection Ratio):

$$CMRR = \frac{I_d}{I_c} \quad CMR = 20 \cdot \log(CMRR) \text{ (dB)}$$

8.3.3 Aislamiento óptico de señales digitales

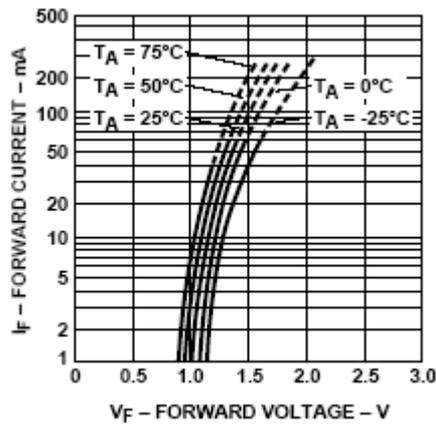
Circuito

Acoplamiento óptico de una señal digital con valores 0V y 5V, utilizando el optoacoplador 4N25.



Cálculo de R_1

Cálculo de R_1 para que la corriente máxima a través del diodo LED sea de 20mA, suponiendo que la excursión de la tensión de entrada se encuentra entre 0V y 5V.



Viendo la gráfica de I_f frente a V_f tenemos que para $I_f=20\text{mA}$, $V_f=1,2\text{V}$. Entonces, como $V_{inMAX}=5\text{V}$.

$$R_1 = \frac{5 - 1,2}{0,02} = 190 \Omega$$

Entre las resistencias disponibles tomamos $R=220$.

Cálculo de R2

Cálculo de R2 para que el transistor se sature con una corriente $I_F=20\text{mA}$.

Como la relación de transferencia de corriente mínima para este optoacoplador es $CTR_{\text{MIN}}=20\%$, tenemos que para $I_F=20\text{mA}$:

$$I_C = \frac{CTR}{100} I_F = \frac{20}{100} 0,02 = 4 \text{ mA}$$

Despreciando V_{CE} , tenemos:

$$R_2 = \frac{5}{0,004} = 1250 \Omega$$

Mediciones sobre el circuito

Este circuito nos proporciona aislamiento galvánico ya que no hay conexión física para la transferencia eléctrica entre la entrada y la salida del circuito, ya que esta transferencia se realiza por medio de radiación electromagnética (luz) que emite un LED y es captada por un fototransistor que actúa como receptor.

Este tipo de optoacopladores presenta dos inconvenientes principales, la falta de linealidad de transmisión de señal y la lentitud de respuesta (a frecuencias altas no es capaz de transmitir la señal).

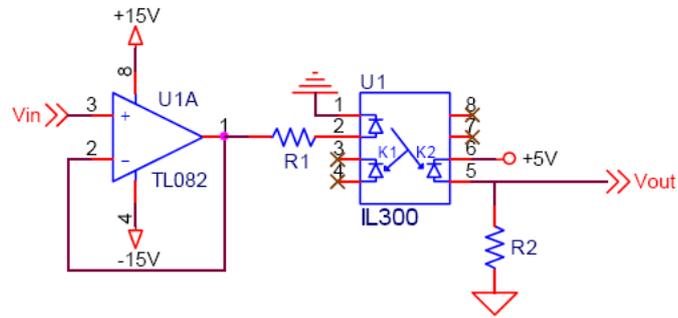
Modificación del circuito para que las señales de entrada y salida estén en fase

Este circuito presenta un desfase debido a que a 0V de entrada el transistor está en corte y por lo tanto a la salida tenemos los 5V de alimentación, mientras que a 5V de entrada, el transistor está en saturación y tenemos a la salida los 0,2V de este estado.

8.3.4 Aislamiento óptico de señales analógicas

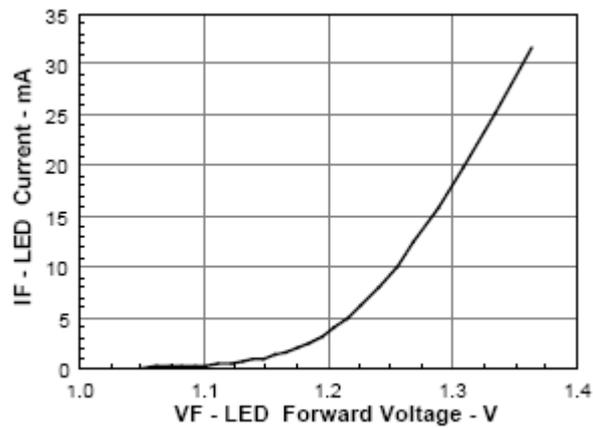
Circuito sin realimentación

Amplificador lineal de aislamiento con ganancia unidad que permite trabajar con señales analógicas en el rango 0V a 5V.



Cálculo de R1

Cálculo de R1 para que la corriente máxima a través del diodo LED sea de 20mA, suponiendo que la tensión de entrada se encuentra entre 0V y 5V.

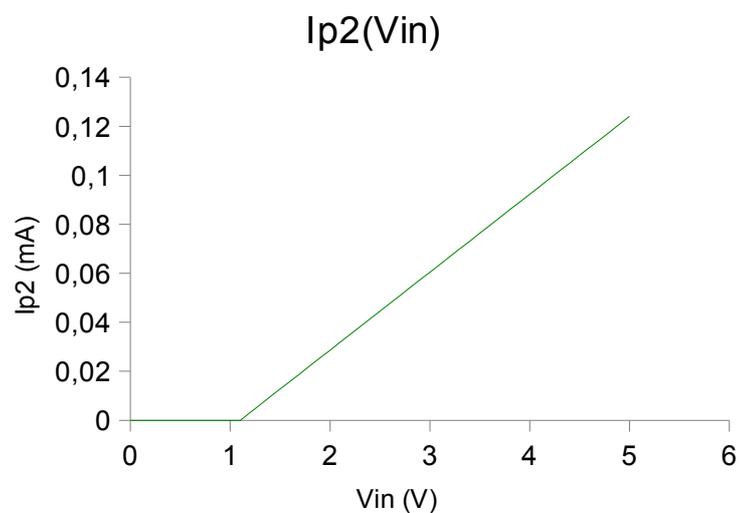


Viendo la gráfica de I_f frente a V_f tenemos que para $I_f=20\text{mA}$, $V_f=1,3\text{V}$. Entonces, como $V_{inMAX}=5\text{V}$.

$$R_1 = \frac{5 - 1,3}{0,02} = 185 \Omega$$

Entre las resistencias disponibles tomamos $R=220$.

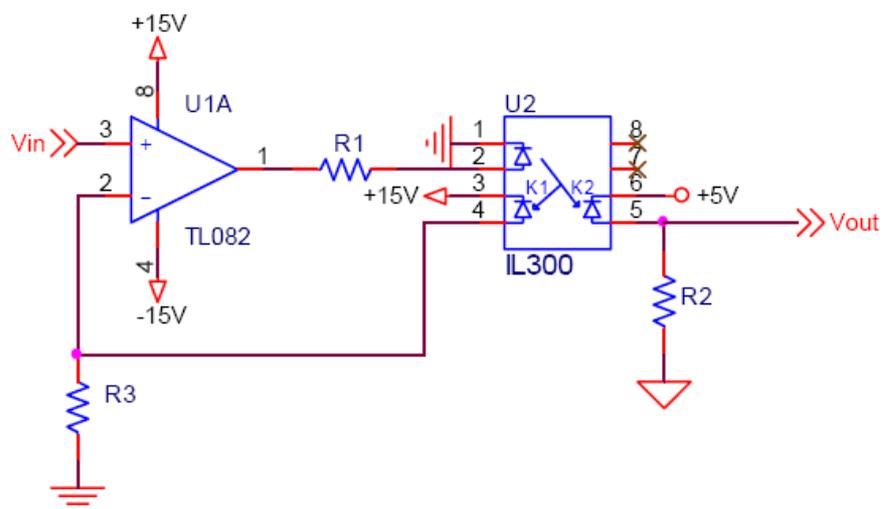
Representación de $I_{P2}(V_{in})$ para $K_2=0,007$



Cálculo de R2

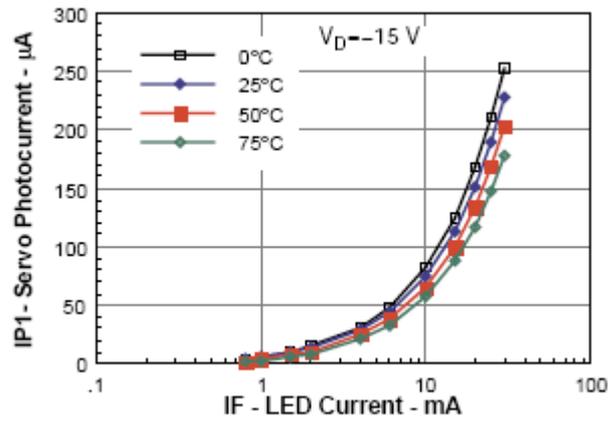
Cálculo de R2 para que en el rango lineal $dV_{out}/dV_{in}=1$.

Circuito realimentado



Cálculo de R3

Cálculo de R3 teniendo en cuenta que para $V_{IN}=2,5V$ la corriente $I_F=10mA$.



Como $I_{p1} = V_{IN}/R_3$ y obtenemos de la gráfica que para $I_F = 10\text{mA}$, $I_{p1} = 75\mu\text{A}$. Entonces:

$$R_3 = \frac{2,5}{75 \mu} = 33300 \Omega$$

Entre las resistencias disponibles tomamos $R = 33\text{k}$.

Cálculo de R2

Cálculo de R2 para que la relación $V_{OUT}/V_{IN} = 1$ cuando $I_F = 10\text{mA}$.

Tenemos que $\frac{V_o}{V_I} = \frac{(K_2 \cdot R_2)}{(K_1 \cdot R_3)} = 1$, entonces como $K_1 = \frac{2,5}{33\text{k}} \cdot 0,01 = 0,0076$ y,

tenemos que $R_2 = 33\text{k} = R_3$ para que la ganancia sea 1.

SENSORES E INSTRUMENTACION
GUEMISA S.L. (N.I.F.: B-87969416)
 C\ De la Fundación 4 Bis - Planta 1º
 Oficina-2
 28522 Rivas Vaciamadrid (Madrid)
 Telf. 91 764 21 00
 ventas@guemisa.com