

C.S.I.C.

Gabinete de Formación

CURSO DE INSTRUMENTACIÓN

**CMIMA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR**

A. Julià y C. Gabarró

Barcelona, 17 – 19 de marzo de 2003

¿Qué vamos a encontrar dentro de un instrumento?

Alimentación

A partir de la red
Pilas y baterías
Protección

Proceso

Sensores
Mediciones
Errores e interferencias
Acondicionamiento de la señal
Análisis de especificaciones

Visualización y/o archivo

Resolución
Presentación analógica
 amperímetros y voltímetros analógicos
Presentación digital
Transferencia de datos a otros sistemas: protocolo serie /paralelo

RECORDATORIO

1. Sin **diferencia de potencial** entre dos puntos no puede circular corriente entre ellos. Si la diferencia de potencial es constante (pilas, baterías o circuitos rectificadores) la alimentación se denomina de **corriente continua (CC)**. Si cambia la polaridad regularmente, se llama de **corriente alterna (CA)**. El número de cambios por segundo se denomina **frecuencia** y se mide en Hertz (**Hz**).

Se mide en volts y comunmente se usan como sinónimos, aunque entre ellos existen matices tensión y voltaje. Se simboliza por **U, V, E, e, u y v**

Cuanto más elevada es la diferencia de potencial, mayor cantidad de corriente o intensidad, se puede hacer circular por un conductor.

2. La **cantidad de corriente** (cantidad de electrones) que circula por un conductor entre dos puntos que tienen una diferencia de potencial entre ellos, se denomina **intensidad**. Se usa habitualmente el término "corriente" por su símil con una conducción de agua. Se mide en amper y se simboliza con la letra **I** ó **i**.

3. La dificultad que ofrece un conductor al paso de la corriente se denomina **resistencia**. Se expresa como **R**. Cuando el circuito se alimenta con una tensión alterna que incluye bobinas y condensadores, la dificultad total al paso de la corriente se denomina **impedancia** y se calcula como la suma vectorial de **R, X_C** y **X_L**. Siendo **X_C** y **X_L** las **reactancias** capacitiva e inductiva del circuito.

$$Z^2 = R^2 + [X_L - X_C]^2.$$

La impedancia se expresa como la **R**, en ohm

Las reactancias se expresan como:

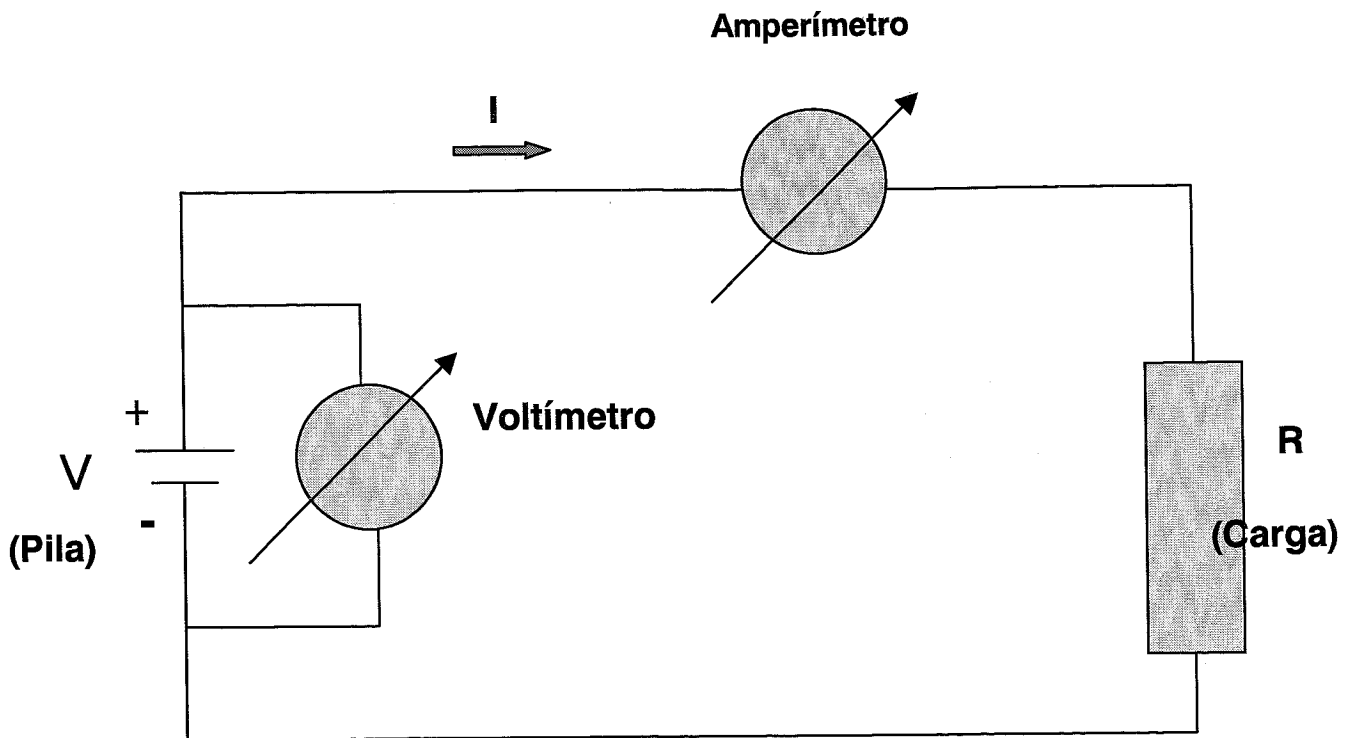
$$X_L = \omega \times L \quad \text{y} \quad X_C = 1 / \omega \times C$$

siendo $\omega = 2 \times \pi \times f$, **L** la autoinducción de las bobinas en Henry (Hy) y **C** la capacidad de los condensadores en Farad (F).

f es la frecuencia de la tensión que alimenta el circuito y para la corriente continua, tenemos $f = 0$.

Cundo no hay condensadores ni bobinas, el circuito se denomina resistivo puro.

CIRCUITO BÁSICO



(Ley de Ohm)

$$I = \frac{V}{R}$$

Potencia consumida $W = V \times I$ (Watt)

Trabajo realizado (energía consumida) $T = W \times t$
(en el tiempo t)

Calor transformado en R, $Q = 0.24 \times T$ calorías(calorías)

En corriente alterna, la potencia real consumida se calcula como

$W = V \times I \times \cos \phi$, siendo ϕ el ángulo de fase entre V e I

La potencia se expresa en Watt (**W**)

1.ALIMENTACIÓN

Alimentación a partir de la red

Generalidades

1. La energía que emplean los instrumentos en su funcionamiento es, en el 95 % de los casos, de corriente continua, el 5% restante es de corriente alterna y corresponde generalmente a motores.

2.

Para obtener las tensiones de trabajo en corriente continua (CC), se pueden emplear pilas o baterías si la potencia necesaria es pequeña y/o el equipo debe trabajar de forma autónoma (no conectado a una red de suministro eléctrico). En el caso de disponer de red, o que la potencia necesaria sea elevada o sean precisas varias tensiones distintas, es preciso que el instrumento disponga de una alimentación a base de una entrada de corriente alterna (CA) a partir de la red y mediante un transformador se generen las tensiones alternas adecuadas que, una vez rectificadas, filtradas y estabilizadas, proporcionen los valores de tensión continua necesarias.

La potencia suministrada a los distintos elementos del instrumento nos dará la potencia total del sistema. En general, se aplica un margen de seguridad del 30 %, dependiendo de la aplicación.

Los equipos alimentados desde la red pueden estar diseñados según dos criterios. En primer lugar están los que incorporan dentro del instrumento, lo que se denomina **fuentes de alimentación**. Permite la conexión directa a 220 volt. En segundo lugar, están los equipos que funcionan a partir de una tensión de CC y requieren un **alimentador** externo para su funcionamiento.

Los equipos con fuente de alimentación directa de 220 volt AC, tienen la ventaja de no requerir ningún aditamento para poder trabajar, a costa de ser en general más pesados y no poder trabajar con tensiones muy generalizadas como la de 12 volt de los coches.

Por el contrario, los equipos diseñados sobre una entrada de CC de 12 volt, por ejemplo, son menos pesados, y podrían conectarse directamente a la toma de corriente de un coche o embarcación. El problema básico reside en que no existe una estandarización en las tensiones de los equipos, aunque el uso de pilas y baterías en los equipos de pequeña dimensión, ha establecido una serie de valores más frecuentes. Estos son, en orden decreciente, 24, 12, 6, 3.6, 1.5 y 1.2 volt. El valor más frecuente en los equipos más usuales es el de 12 volt. En la actualidad, debido al diseño de fuentes de alimentación conmutadas, es posible disponer de equipos en los que el rango de tensiones de entrada va desde 7 a 32 volt, con una tensión de salida fija.

A partir de la red de corriente alterna, se pueden obtener las distintas tensiones de alimentación del equipo empleando una fuente de alimentación basada en un transformador o una fuente de alimentación conmutada capaces de dar la potencia suficiente.

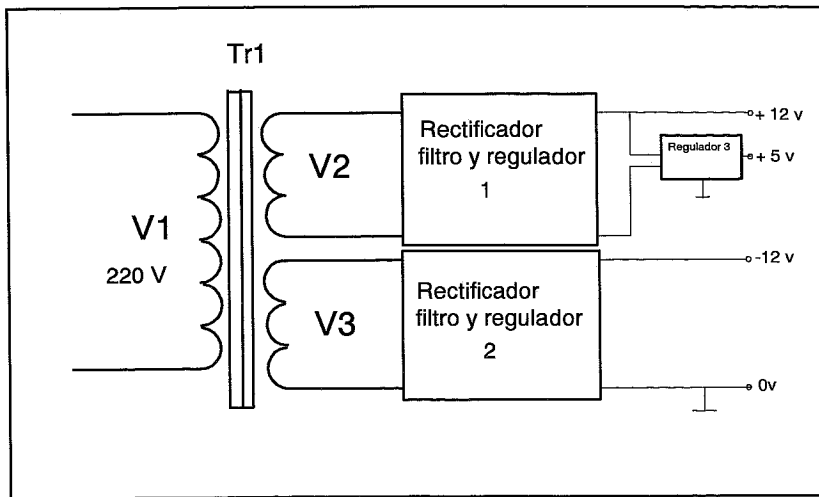


figura 2

Alimentación a partir de la red de alterna convencional con transformador

La potencia que debe soportar el transformador es igual a la suma de las distintas potencias suministradas a las distintas tensiones.

El ejemplo expuesto podría alimentar un sistema de tres tensiones típica de un ordenador: + 12 v, -12 v y +5 v.

En el esquema no se indican los componentes de rectificación y filtrado de la tensión.

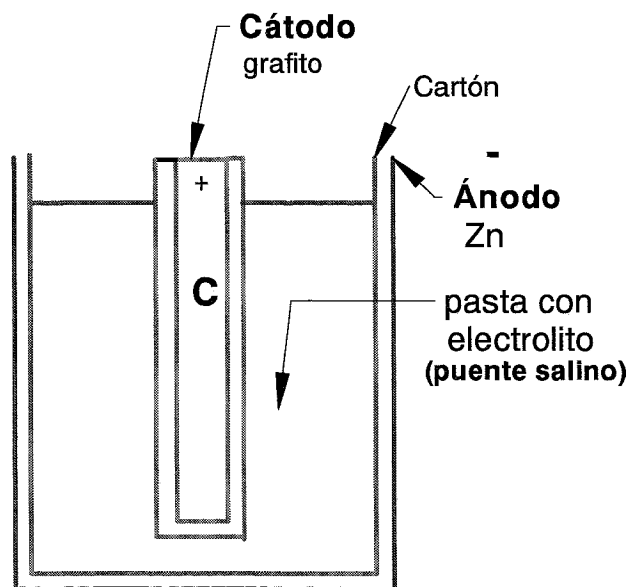
Alimentación a partir de pilas y baterías

Se denominan pilas o baterías a unas células cerradas donde tiene lugar una reacción química de oxidación – reducción, estableciéndose una diferencia de potencial entre las dos partes de la célula.

- Si la reacción es reversible, en castellano recibe el nombre de batería, reservándose el de pila a la célula en que la reacción es irreversible, porque generalmente implica destrucción de alguno de sus elementos (Zn)

- Se las llama secas cuando el electrolito está empapando un material inerte, poroso, a diferencia de las de electrolito líquido, contenido en vasos y que sólo se emplean actualmente, en las baterías de plomo.

- A pesar de la amplia variedad de tipos y modelos, todas las pilas se basan en el mismo proceso: una reacción de oxidación – reducción en dos ámbitos de la célula, entre los cuales se establece una diferencia de potencial



Electrolito:

pilas ácidas:



pilas alcalinas:



figura 3

Tipos de pilas más usuales

Pilas Zn – C (Leclanché)

Son las de costo más bajo y se presentan en todos los formatos, siendo los más usuales, los indicados en la tabla de la fig. 4

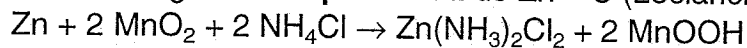
Pueden ser ácidas o alcalinas

En ambas se produce la oxidación del recipiente (cátodo) de Zn (por lo que no se pueden recargar)

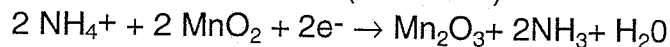
Las de electrolito **ácido** emplean el NH_4Cl y las alcalinas KOH ó NaOH

Las alcalinas tienen una mayor duración debido a la menor corrosión que sufre el Zn frente al electrolito en un medio alcalino

La reacción de descarga de una **pila ácida** de Zn – C (Leclanché) es:



Eléctricamente en el cátodo tenemos (reducción):



y en el ánodo (oxidación): $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{+2} + 2 \text{e}^-$

En una pila seca **alcalina** (KOH ó NaOH),

En el ánodo (oxidación): $\text{Zn} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{ZnO} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$

En el cátodo (oxidación): $2 \text{MnO}_2 + 2\text{e}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 + 2 \text{OH}^-$

En ambos casos, a diferencia de potencial que se obtiene es del orden de 1.5 volt

Pilas de óxido de plata

Se emplea el óxido de plata como cátodo y el Zn como ánodo, con KOH como electrolito. Tienen una capacidad de carga moderada pero una tensión de descarga muy estable. Para relojes.

Tipos de pilas más comunes

Modelo	Tensión (V) Alcalina / Li	Capacidad Q (Ah) Alcalina / Li	Carga máx nominal (mA) ⁽¹⁾	Peso/Tamaño g / mm (L x D)
LR03 (AAA)	1.5/3.65	1.05/0.85 ⁽²⁾	50 / 35	11 / 45 X 10
LR 6 (AA)	1.5/3.65	2.40/1.9	120 / 100	23 / 50 x 14.5
LR 14 (C)	1.5/3.65	6.3/6.7	300 / 170	61 / 49 x 26.6
LR 20 (D)	1.5/3.65	12/16.5	600 / 300	134 / 61.8 x 33.6
6LR61(PP3)	9/9 ⁽³⁾	0.55/9.0	15 / 12	46 / 47 x 26 x 17

Figura 4

- (1) La descarga máxima en las alcalinas no debe superar el 60 % de la carga para las de Li, no se debe superar el 40 % de la carga Q
- (2) Tamaño ½ AA
- (3) ULTRALIFE. Incorpora 3 células de Li en serie.

Baterías recargables

Generalidades

En las baterías recargables, se produce una reacción reversible con elevado rendimiento.

Según el tipo de reacción, las baterías dan tensiones de electrodo diferentes. En la lista que sigue se indica el tipo de reacción y la tensión entre bornes.

El mayor problema de las baterías recargables reside en la dificultad que hay para conocer el estado de carga de la misma. Dado que se trata de reacciones reversibles, con un rendimiento inferior al 100 %, se debe considerar que en cada ciclo de descarga – carga, va disminuyendo el techo de carga asequible. A esta disminución se la llama efecto de memoria. Es pequeño en las baterías de plomo, pero elevado en las de metal.

Otra característica de las baterías recargables es su estabilidad de la tensión mientras se produce la descarga. En el caso de las baterías de plomo, la tensión sufre una disminución importante durante la descarga, pudiendo llegar a pasar de un valor nominal de 12.5 volt a 8 volt. En el caso de las baterías de metal, la tensión es mucho más estable.

Otra característica que diferencia las baterías de plomo de las de metal, es su forma de carga. Las primeras se deben cargar con una tensión constante, mientras que las segundas deben hacerlo a corriente constante. Por esto debe emplearse el cargador específico para cada tipo de batería.

Por último, conviene destacar que al proyectar el uso de una batería recargable, nunca conviene pasar de una descarga superior al 50 % nominal de la misma, debido a la disminución de la tensión y a la bajada del rendimiento de la reacción de oxidación – reducción.

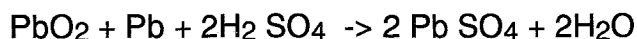
Tipos de baterías más usuales.

Baterías de plomo - ácido

Permiten un elevado número de ciclos de carga y descarga, con alto rendimiento y gran capacidad de corriente

Los vasos que contienen el electrolito y los electrodos dan una diferencia de potencial del de 2 voltios, por lo que se les conecta en serie para llegar al voltaje nominal de 6 ó 12 volt.

Están formadas a base de Pb y PbO₂ y la reacción de descarga es:



El mayor inconveniente es su peso y el contenido en H₂SO₄ muy concentrado, altamente corrosivo. No son aconsejables en instalaciones sometidas a movimientos violentos. Deben cargarse ventiladas.

Se presentan en amplio abanico de capacidad de corriente y en sistemas cerrados con el $H_2 SO_4$ embebido en un material inerte. Son adecuadas para instalaciones en el mar.

•**Baterías de metal**

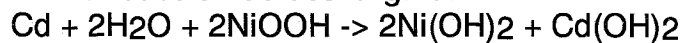
Son las más usadas en los instrumentos portátiles, en los que sea posible el proceso de recarga.

Las más usadas son:

Ni – Cd, en la que el Cd es el ánodo y el cátodo está formado por hidróxido de Ni

$$V_{bat} = 1.2 \text{ volt}$$

La reacción de descarga es:



Ni- MH, permiten un número de ciclos de carga – descarga 40% mayor que las de Ni-Cd aunque tienen una mayor autodescarga. $V_{bat} = 1.2 \text{ volt}$

NOTA:

Se recomienda la consulta a la página WEB

www.greenbatteries.com/documents/Battery_Guide.pdf

donde se encuentran descritas todos los tipos de pilas y baterías, así como la legislación que especifica su etiquetado y recuperación.

Protección

1. Protección frente a problemas que vienen por la red

Oscilaciones parásitas en la tensión nominal de la red:

Transitorios: Transformador – Separador y toma de tierra

Variaciones lentas: Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI)

La tensión que llega por la red al usuario, tiene normalmente, unos picos de tensión superpuestos a la tensión senoidal nominal, que son de corta duración pero con valores de pico que pueden superar en ocasiones, entre 5 y 500 veces el valor de la tensión nominal. Están producidos por otros equipos conectados a la misma red. Esos picos de tensión pueden ser suficientes para perforar el aislamiento de los circuitos de entrada de los instrumentos y provocar su avería.

Para evitar este efecto, es necesario proteger a nuestros instrumentos mediante filtros que sean capaces de absorber los transitorios de más energía. Para ello disponemos de una serie de herramientas que, colocadas entre la red y el sistema que queremos proteger, absorberán una buena parte de estos transitorios.

El primer elemento básico en una instalación de medida, es la **toma de tierra**. Se llama así a una conexión concebida para que la instalación quede al mismo potencial de referencia, situada cerca de la acometida de entrada al edificio. Discurre paralela a toda la instalación eléctrica y sirve para mantener este "0" de referencia entre todos los equipos.

Los problemas surgen cuando la instalación presenta uno o varios de los siguientes problemas:

- La línea de tierra no tiene la sección suficiente para retornar a la toma de tierra de la entrada toda la corriente de fuga de todos los instrumentos conectados. Al ser una línea de cobre, tiene su resistencia, y aunque pequeña, genera diferencias de potencial entre distintos equipos. Por ello es fundamental que los equipos no tengan corriente de fuga, lo que debe verificarse individualmente para detectar fugas individuales (el equipo "pica").

- Si a la misma línea de alimentación se han conectado equipos con cargas inductivas. Los equipos de alto consumo inductivo (bobinas), como motores o relés de potencia elevada, al conectarse, generan picos de tensión que se propagan por la red.

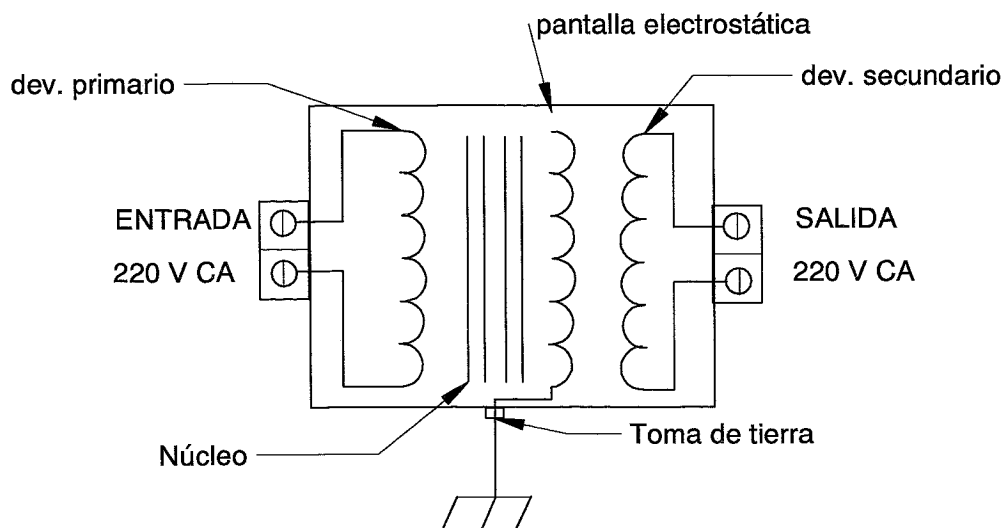
- Una instalación debe disponer de limitador de corriente de fuga (**diferencial**), que desconecta la línea cuando la corriente de fuga es superior a

los 30 mA, (corriente capaz de provocar una fibrilación auricular). Si el dispositivo no existe o está defectuoso, no ofrece ninguna protección.

Cuando la instalación debe proteger personas o instrumentos especialmente delicados, que implican por ejemplo la medida de tensiones muy pequeñas, se acostumbra a instalar un transformador con apantallamiento electrostático, que se conecta a una buena toma de tierra. Esta instalación crea un aislamiento local, del resto de la red.

La potencia del transformador debe prever la potencia que tiene conectada y se puede emplear para alimentar varios equipos a la vez.

TRANSFORMADOR SEPARADOR APANTALLADO



La **electricidad estática** puede ser otra fuente de picos de tensión elevada, que puede perforar los componentes de nuestros instrumentos, al tocarlos con nuestras manos o mediante herramientas metálicas (destornilladores, p.ej.). En el caso de tener que manipular este tipo de equipos o componentes, es necesario que el operador tenga algún sistema de protección, que va desde el uso de ropa no sintética, calzado no aislante y la conexión física con un cable a tierra.

Fallo de suministro:

Grupo electrógeno

SAI. Determinación de la potencia y carga necesarias

El fallo de la red externa de alimentación nos deja al sistema sin capacidad de funcionar. En algunos casos, es posible esperar la reanudación del suministro, pero en la mayoría de los casos es preciso continuar un proceso ya iniciado (posible destrucción de las muestras, por ejemplo). En tal caso es preciso disponer de una fuente de energía capaz de mantener en funcionamiento al equipo.

Para ello se dispone de sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) capaces de funcionar el tiempo necesario para terminar el proceso. Si el consumo es muy elevado, el tiempo de interrupción de suministro es importante o son muchos los equipos que deben trabajar en estas condiciones, es aconsejable disponer de un generador de corriente alterna, similar a la que proporciona la red normal, y que entra en funcionamiento de forma automática en el caso de fallo de suministro de red. El generador o grupo electrógeno, que debe ser revisado periódicamente para no tener sorpresas desagradables en el momento en que hace falta, tarda un cierto tiempo en poder proporcionar la tensión de alimentación precisa. Este tiempo es de varios segundos, pudiendo llegar a ser de hasta 20 seg, en un buen generador. Evidentemente, este lapso de tiempo es excesivo para los instrumentos de medida que emplean microprocesadores programados, perdiéndose el programa residente, los datos acumulados y el control entre elementos de mismo. Un SAI intercalado entre la toma de red y el instrumento, podrá hacer frente a este fallo.

Los SAI disponibles en el mercado, se clasifican en dos categorías según su forma de trabajo. Los denominados ON LINE, proporcionan la tensión de salida haciendo funcionar siempre un convertidor de CC a CA, a partir de una batería. La tensión de entrada, se rectifica y alimenta a dicha batería. Cuando falla la corriente, no existe tiempo de conmutación del SAI ya que la salida está siempre conectada a la batería. Mientras esta dure, durará la salida.

Los SAI OFF LINE usan un convertidor de CC a CA que sólo entra en servicio cuando falta la entrada de red. El tiempo de conmutación es muy pequeño, de forma que la mayoría de procesos no detectan el corte.

Los SAI ON LINE son más caros y su uso se reserva a los equipos o procesos más caros o irrepetibles. Los ordenadores normales pueden funcionar perfectamente con los SAI OFF LINE.

En la especificación de un SAI, debe considerarse tanto la potencia a suministrar, medida en VA (volt x ampere), como la duración que debe tener hasta el final del proceso o corte de energía, que vendrá dada por el tamaño de la batería en Ah (ampere x hora).

2. Protección frente a un aumento súbito de consumo dentro del instrumento

A la entrada del instrumento, se deben colocar fusibles lentos, de la corriente adecuada para proteger tanto a la instalación como al propio instrumento. Deben ser lentos para que no se fundan en el momento de puesta en marcha del mismo, en que se produce un pico de corriente.

Conociendo la potencia que consume un instrumento, W , es fácil calcular el valor que debe tener un fusible de entrada, al dividir W por la tensión de alimentación, normalmente de 220 volt. Se debe dar un margen del orden del 20 %. Es decir, para proteger un equipo que tiene un consumo de 100 VA y lo alimentamos a 220 volt, deberemos intercalar un fusible lento de $100/220 = 0.45$ A. Si le añadimos un margen del 20% tendremos 0.55 A. Como se trata de un valor que no es estándar deberemos poner un fusible de 0.5 A o de 0.750 A.

Dentro de los instrumentos, y dependiendo del grado de complejidad que tengan, se disponen circuitos capaces de limitar el consumo de corriente cuando esta supera un determinado valor. En muchos casos basta un simple fusible, que en este caso debe tener un tiempo de respuesta corto, es decir, fusibles rápidos.

El empleo de pilotos de luz, en forma de diodos LED o tubos de gas, permite monitorizar la presencia o ausencia de tensión en una parte del circuito. Esto puede ser de gran utilidad en el caso de mal funcionamiento del equipo.

2.PROCESOS

1. SENSORES:

En general, se denomina sensor o transductor a todo dispositivo que convierte una señal de una magnitud física en una señal equivalente pero de otra magnitud física distinta. Es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra.

Un sistema de medida es directo cuando se deduce información cuantitativa acerca de una magnitud física, mediante comparación directa con una referencia, o de forma mecánica, por ejemplo el termómetro, presión, etc. En las medidas indirectas la magnitud de interés se calcula a partir de otras magnitudes físicas y de la aplicación de ecuaciones que describe la ley que relaciona dichas magnitudes, por ejemplo la salinidad.

Según la señal de salida los sensores se clasifican en **analógicos o digitales**.

Las medidas analógicas son las que están relacionadas con la monitorización continua de la magnitud de una señal o cantidad a medir. En los analógicos la salida varía de forma continua.

La mayoría de los instrumentos digitales visualizan la cantidad medida en cifras discretas reduciendo de este modo el error humano asociados a instrumentos analógicos de aguja. En los sensores digitales la salida varía en forma de saltos discretos. Tienen mejor resolución, mayor fidelidad, mayor fiabilidad y muchas veces mayor exactitud. Muchos instrumentos digitales poseen una salida que permite el registro analógico o digital permanente de las medidas de manera automática. Los dispositivos digitales muestrean la señal de entrada, entonces la cantidad visualizada es una medida discreta.

2. MEDICIONES

Es imposible averiguar exactamente el **verdadero valor** de cualquier magnitud física; el valor asignado llevará siempre asociado a él una incertidumbre.

Entonces el **valor medio** es el indicado por un instrumento o determinado por un proceso de medida. Se debe acompañar con su incertidumbre o el posible límite de error asociado con la medida.

El valor nominal es generalmente el valor de un componente dado por el fabricante; por ejemplo una resistencia de 10 K Ω . Este valor tiene que ir acompañado por una **tolerancia**, por ejemplo $\pm 10\%$. La interpretación de lo anterior es que el verdadero valor está entre 9.9 K Ω y 10.1 K Ω .

A continuación se recuerdan algunas definiciones importantes para la comprensión de los resultados de las medidas.

Exactitud (o precisión, en inglés accuracy): Es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar resultados que se aproximen al valor verdadero de la medida.

Por ejemplo, dado un sistema de medición de temperatura de precisión $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, cuando su lectura fuese de 37.2°C significa que la temperatura del ambiente medido está entre 37.15 y $37.25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Habitualmente, la precisión se expresa como porcentaje de la escala completa. Por ejemplo, un termómetro cuyo fondo de escala fuese 100°C y de precisión 0.5% del fondo de escala, significa que toda lectura de $T\text{ }^{\circ}\text{C}$ estará sujeta a una imprecisión de 0.5°C (si se mide 37.2°C , la temperatura estará entre 36.7 y $37.7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Fidelidad (o repetibilidad, en inglés precision): Es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de dar el mismo valor de la magnitud medida, en medir varias veces en unas mismas condiciones determinadas, sin tener en cuenta la discrepancia con el valor real de esta magnitud. En la figura 1 se expresa la diferencia entre la exactitud y la fidelidad

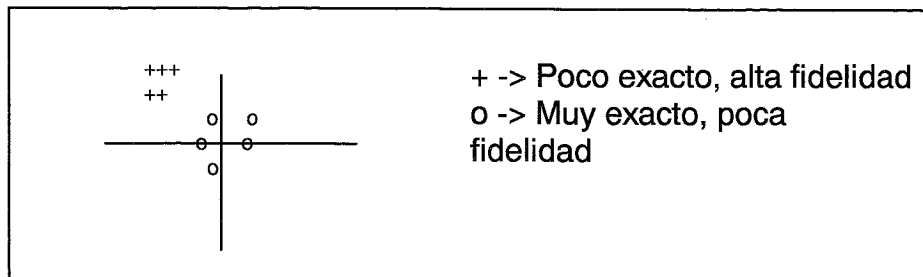


Figura 1: Diferencia entre exactitud y fidelidad

Resolución (o discriminación): Es el incremento mínimo de la entrada mediante el que se obtiene un cambio en la salida. Si la presentación es analógica la resolución está limitada por la capacidad de apreciar visualmente un cambio. Si es digital, es determinada por la variación de 1 en la cifra menos significativa del número resultado de la medida y también por el número de bits del conversor A/D. Cuando el incremento de entrada se produce a partir de cero se habla de umbral.

Función de transferencia. Un instrumento se puede caracterizar formalmente mediante su función de transferencia, es decir, por su modelo matemático Entrada/Salida, donde la entrada es el valor real de la variable a medir y la salida es la lectura en el instrumento. Las funciones de transferencia de instrumentos de alta calidad suelen estar disponibles en las especificaciones del fabricante.

Sensibilidad: Es la pendiente de la curva de calibración, que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medida. También puede entenderse como

la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento para dar una respuesta respecto a un cambio en la variable medida (figura 2).

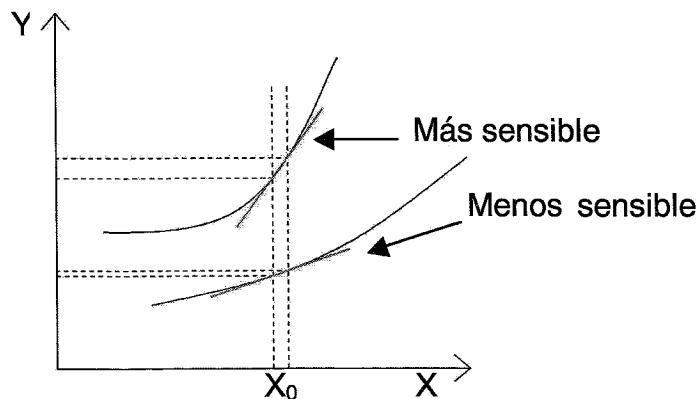


Figura 2: La sensibilidad es la pendiente en un punto de la curva de calibración

Para un sensor cuya salida esté relacionada con la entrada x mediante ecuaciones $y=f(x)$, la sensibilidad en el punto x_a , $S(x_a)$, es:

$$S(x_a) = \frac{\delta y}{\delta x} \cong \left. \frac{\Delta y}{\Delta x} \right|_{x=x_a}$$

En los sensores interesa tener una sensibilidad alta y, si es posible, constante. Para un sensor con respuesta

$$y=kx+b$$

la sensibilidad es lineal, $S=k$ para todo el margen de valores de x aplicables. Para uno cuya respuesta sea

$$y = kx^2+b$$

la sensibilidad es $S=2kx$ y varía a lo largo de todo el margen de medida.

Calibración: Los instrumentos de medida con el tiempo y el uso van perdiendo las cualidades que se expresan en las especificaciones, sufren derivas, pérdida del cero, etc. La calibración consiste en comparar el instrumento de medida con uno de referencia de mayor calidad y ajusta las curvas de la función de transferencia del instrumento de medida. Para ello es necesario que el instrumento sea calibrado regularmente (p. ej. cada año), o en los periodos de tiempo que establece las especificaciones del instrumento.

Derivas: Variación de la curva de calibración (o función de transferencia) respecto a condiciones externas, p.ej. el tiempo, la temperatura, la presión, etc., e internas como un cambio de los valores de los componentes. Obliga a calibrar los instrumentos periódicamente.

Margen dinámico: (en inglés *span*) Es el intervalo del valor a medir por el que el instrumento a sido diseñado, es decir: Fondo de escala - estado de reposo (cero).

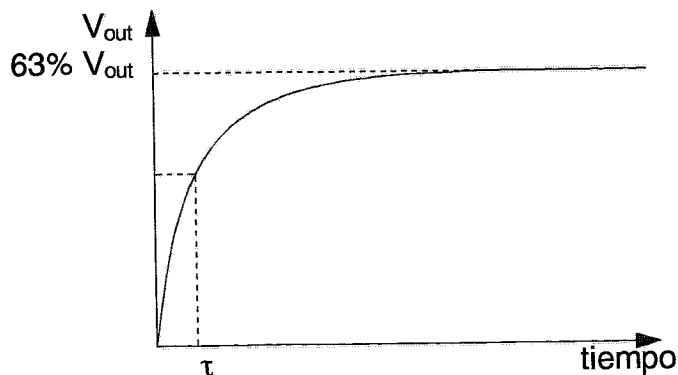
Rango o escala: Expresa los límites inferior y superior de la medida del instrumento. Por ejemplo, en el caso del correntímetro Aanderaa las mediciones de conductividad del agua suelen realizarse con el rango de 0 a 74 mS/cm.

Muchos instrumentos, permiten definir sub-rangos de su rango intrínseco. Para el instrumento anterior es posible tener también los rangos: 24-68 mS/cm y 24-36 mS/cm. La resolución de este instrumento es de 0.1% del rango, por lo tanto esta será mejor para el rango menor. Así pues el rango de trabajo mejora la resolución pero no la sensibilidad.

Fondo de Escala: Cualquier instrumento tiene una escala con dos extremos. El que corresponde al reposo será generalmente el cero de dicha escala, mientras que en el extremo opuesto medirá un valor que se conoce como Fondo de Escala. Este valor es el máximo que el instrumento puede medir. Para el ejemplo anterior el Fondo de Escala para el primer rango es de 74 mS/cm.

Umbral mínimo: (threshold en inglés) Es el nivel mínimo que debe tener una variable para poder ser medida.

Tiempo de Respuesta. La medición de cualquier variable de proceso implica generalmente una demora, debida a fenómenos de equilibrio, transporte, etc., que debe ser definida adecuadamente. Cuanto más pequeña sea la constante de tiempo mejor será el sistema. El tiempo de respuesta se define como el tiempo necesario para obtener una medida que corresponda al 63% (o cualquier otro porcentaje previamente establecido) del valor final. Si la medición tiene una respuesta más lenta que la de la propia variable, habrá que disponer de otros sistemas de medida.



Bit: Es la unidad de información más pequeña. Puede tener sólo dos valores o estados: 0 o 1, encendido o apagado. La combinación de estos dos valores es

la base de la informática ya que los circuitos internos de ordenadores, sólo son capaces de detectar si llega o no corriente (0 o 1).

Limites de confianza

Cuando medimos una misma magnitud varias veces, y consideramos el valor medio como el valor de la magnitud medida, nos podemos preguntar: ¿hasta que punto el valor real de la magnitud es representado por esta media?

Para una variable aleatoria con distribución normal (o para un número de medidas mayor de 30), consideramos su media esperada μ , la calculada x , y la varianza σ^2 , obtenidas con una muestra de n medidas. λ y α son dos valores que se obtienen el uno a partir del otro a través de las tablas de *t student*. Entonces podemos decir que la probabilidad que el valor verdadero esté dentro del intervalo $\lambda \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ es de $1-\alpha$:

$$\text{prob} \left[-\lambda \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq x - \mu \leq +\lambda \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha$$

entonces,

$$x - \mu \leq \left| \lambda \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right| \quad \text{para probabilidad de error de } 1-\alpha$$

Donde λ depende de la precisión con que se quiere trabajar. Para una probabilidad del 95% de que el intervalo incluya el valor correcto (muchos estudios biológicos), se tiene que $\lambda = 1.96$. Para una probabilidad del 99% de tener el valor correcto en el intervalo, se usa $\lambda = 2.58$.

Al intervalo $\pm \lambda \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ se le llama intervalo de confianza.

A partir de esta expresión podemos calcular el número de datos que debe tener la muestra para tener el resultado con una probabilidad de error determinado. Si tenemos que trabajar con una probabilidad de error, de por ejemplo $p \geq 0.99$, y un error relativo de $\varepsilon = 1\%$ ($\varepsilon = 0.01$), tendremos $\varepsilon = \frac{x - \mu}{x} = 0.01$ y $\lambda = 2.58$, así podemos calcular el número de datos necesario como,

$$n = \left(\frac{\lambda \sigma}{x - \mu} \right)^2$$

Un ejemplo de esto sería el siguiente: deseamos encontrar el intervalo de confianza al 95% ($\alpha=0.05$) para medir la temperatura de una masa de agua (valor verdadero = μ) con las siguientes condiciones: medimos la muestra 20 veces y la temperatura media obtenida es de $x = 12.7^\circ\text{C}$. El sensor de temperatura está perfectamente calibrado y la única fuente de error es el propio ruido interno, que tiene un nivel de ruido de 0.5°C (desviación standard). Como

queremos un intervalo de confianza de 95%, el valor de λ será 1.96. Entonces sustituyendo estos valores en la ecuación anterior:

$$\left[12.7 - 1.96 \cdot \frac{0.5}{\sqrt{20}} \leq \mu \leq 12.7 + 1.96 \cdot \frac{0.5}{\sqrt{20}} \right]$$

Y podemos afirmar que hay el 95 % de probabilidad de que valor verdadero esté dentro del intervalo $12.48^{\circ}\text{C} \leq \mu \leq 12.92^{\circ}\text{C}$.

3. ERRORES E INTERFERENCIAS

Tipos de error:

La diferencia entre el resultado de la medida y el valor correcto se llama **error absoluto**. El **error relativo** es el cociente entre el error absoluto y el valor correcto.

Es importante conocer el error que hacemos al medir con un instrumento, pero también el intentar minimizar estos errores. Para ello procederemos a descomponer los errores en 3 tipos diferentes: Aberrantes, sistemáticos y aleatorios.

Los **errores aberrantes**, son los que aparecen pocas veces en relación con el número total de medidas de la misma magnitud realizadas. El resultado de la medida que es afectada por este tipo de error se considera que es falsa, y por lo tanto hay que eliminarla del conjunto de resultados obtenidos. Es necesario un criterio para poderlos descartar. Estos criterios se basan en argumentos estadísticos aplicados a la desviación de estos respecto a la mediana.

Un **error es sistemático** cuando en diferentes medidas de una misma magnitud, en las mismas condiciones, éste es constante en valor absoluto y signo o bien éste varía según una ley definida. Este tipo de errores origina un sesgo (bias en inglés) en las medidas, que si se detecta se puede corregir. Para detectarlos y corregirlos en instrumentos de medida hay que comparar el resultado de este instrumento con el resultado de otro considerado de referencia, o sea realizar una calibración.

Los **errores aleatorios** se manifiestan cuando se mide repetidamente la misma magnitud, con el mismo instrumento y el mismo método y tienen las propiedades siguientes:

- 1.- Los errores aleatorios positivos y negativos del mismo valor tienen la misma probabilidad de producirse.
- 2.- Los errores aleatorios son menos probables cuando más grande sea su valor.
- 3.- Al aumentar el número de medidas, la media aritmética de los errores de una muestra tiende a cero.

Los errores aleatorios son inevitables. Pero si se realiza el promedio de diferentes medidas éstos se cancelan y quedan sólo los errores sistemáticos.

Fuentes de error

Los factores que provocan errores en las medidas pueden clasificarse en controlables e incontrolables. Si se combina esta clasificación con la de los tipos de error aparece la tabla 1.

Fuentes de error	Tipo de error		
	E. aberrantes	E. sistemáticos	E. aleatorios
Factores controlables			
Operario	Lectura errónea Cálculo erróneo	Lectura (personal) Cálculo (redondeo)	Lectura (interpolación)
Instrumento	Avería	Cero Deriva	Vibraciones Variaciones climáticas
Método	Formulación incorrecta Frecuencia muestreo inc.	Margen de la medida Influencia de la medida	Número de medidas
Factores incontrolables	Contactos defectuosos Excesiva temperatura Falta de aislamiento eléctrico	Factores ambientales fuera de los márgenes Sobretension de la red Interferencias electromagnéticas	Corriente de aire Cargas electrostáticas Fluctuaciones en factores ambientales

Tabla 1: Fuentes de errores.

El operario puede ser la fuente de todo tipo de error. A parte de los errores aberrantes evidentes, si la lectura es incorrecta, se pueden tener errores sistemáticos, por ejemplo, los debidos a la lectura, porque un observador puede tener una tendencia psicológica a dar lecturas más altas, o más bajas que otro. El redondeo también puede ser un error sistemático. Si la lectura se obtiene por interpolación, el error puede ser aleatorio.

Un instrumento estropeado es una fuente segura de error aberrante, pero es fácilmente detectable. No lo es tan fácil detectar errores sistemáticos del instrumento. Este tipo de error son las derivas temporales debidas a las variaciones inevitables de las características de los dispositivos electrónicos con el tiempo. El error de cero indica que cuando la señal de entrada es nula puede existir una indicación no nula en el sistema de presentación de resultados.

La presencia de vibraciones mecánicas y las variaciones climáticas que no sean monótonas son fuentes de errores aleatorios.

El método de medida puede ser una fuente de error aberrante, por ejemplo cuando la formulación del problema es incorrecta o si se muestrea a frecuencia inferior a dos veces la frecuencia de variación de la magnitud (no cumple Nyquist).

El número de medidas de una misma magnitud es un factor que determina la exactitud de la medida, y junto con los errores sistemáticos del instrumento, es el factor de error más frecuente, por lo tanto debe recibir cierta consideración.

Los efectos ambientales son también importantes. Estos se manifiestan como un cambio gradual o deriva en la salida cuando no hay cambio en la entrada. Los más comunes son los efectos térmicos, que pueden ser debidos al calentamiento de los componentes dentro del instrumento o a cambios en la temperatura ambiente. Los efectos de la humedad del aire tienden en general a ser pequeños, excepto medidas que involucran resistencias de muy alto valor. Estos efectos pueden ser debidos a una variación en las propiedades conductoras de los materiales o bien causados por la absorción de la humedad en los materiales.

Interferencias

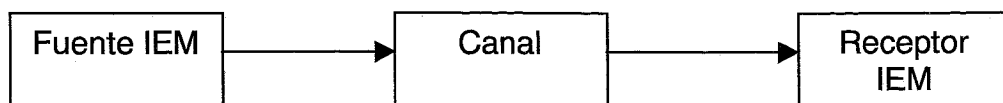
En instrumentación electrónica, se considera interferencia a toda señal externa a la magnitud de interés, que influya en el resultado. Normalmente se considera la interferencia electromagnética, IEM (EMI en inglés). Las interferencias internas de los componentes se les llama ruido. Se definen las cualidades de un instrumento como:

Inmunidad: la aptitud de un equipo de funcionar correctamente en presencia de posibles interferencias presentes en el entorno.

Susceptibilidad: La vulnerabilidad de un equipo a estas interferencias.

Compatibilidad Electromagnética: (EMC en inglés) Es la aptitud de un equipo de funcionar correctamente en el entorno en el que ha sido diseñado, sin afectar ni ser afectado por otros equipos.

Cualquier problema de interferencias implica tres elementos: la fuente o generador de interferencias, el canal o vía para acoplarse estas interferencias y el receptor o víctima de la interferencia.



Según sus orígenes, las fuentes de interferencia se clasifican en:

- **Naturales :**
 - *Terrestres*: relámpagos, descargas eléctricas
 - *Extraterrestres*: sol, radiación cósmica, etc.
- **Artificiales:**
 - *ocasionales*: suelen ser las más peligrosas, pero solo afectan los equipos más cercanos. Son por ejemplo: sistemas de generación de energía (50Hz), máquinas (electrodomésticos, ascensores), sistemas de encendido eléctrico (motores, automóviles, herramientas...).
 - *intencionadas*: aquellas diseñadas para que emitan energía electromagnética, p. ej. radio televisión, móviles, radar, etc.

Para reducir las interferencias de origen artificial, muchas veces no se puede actuar sobre la fuente y no siempre es posible inmunizar el receptor. Queda, entonces, la alternativa de actuar sobre el canal o vía de acoplamiento.

Soluciones a algunas interferencias típicas:

- Red de distribución eléctrica: Para reducir las interferencias que entran por la red hay que usar filtros de red (cortan el paso de señales fuera de la banda de 50-60 Hz) o un SAI. También se evitará si se usan baterías.
- Conexión a tierra: La conexión a tierra se usa para proteger al usuario de descargas eléctricas, pero esto puede producir interferencia, ya que se crea un gradiente de tensión que se suma a la señal. Para reducir este tipo de interferencia hay que asegurarse que cada circuito esté puesto a tierra en un único punto.

Para reducir las interferencias en general, usaremos apantallamientos.

-Apantallamiento de instrumentos: Se protege el instrumento receptor de las interferencias con una caja metálicas o de plástico (con pintura metalizada) que actúan de aislante. Pero el apantallamiento sólo será efectivo si el blindaje se conecta a un potencial constante y si la conexión se hace en un sólo punto.

- Apantallamiento de cables: Mientras que el blindaje de los instrumentos es intrínseco a su diseño y no deja al usuario actuar, el blindaje de los cables es responsabilidad del usuario. Normalmente usaremos cables coaxiales con una malla conductora que rodea el conductor central (ver figura 3). Hay modelos con dos conductores separados, cada uno con su malla, o con malla común. En los casos donde hay interferencias fuertes se utilizan cables donde una lámina de aluminio rodea completamente el conductor central (d). La malla debe conectarse al potencial de masa, en un único punto. En la figura 4 se muestra la forma correcta de conectar la malla a tierra para evitar las interferencias.

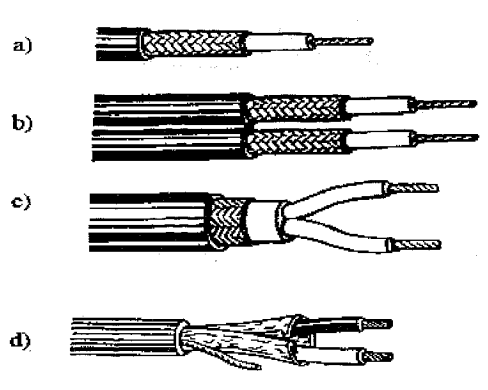


Figura 3: Diferentes tipos de coaxials.

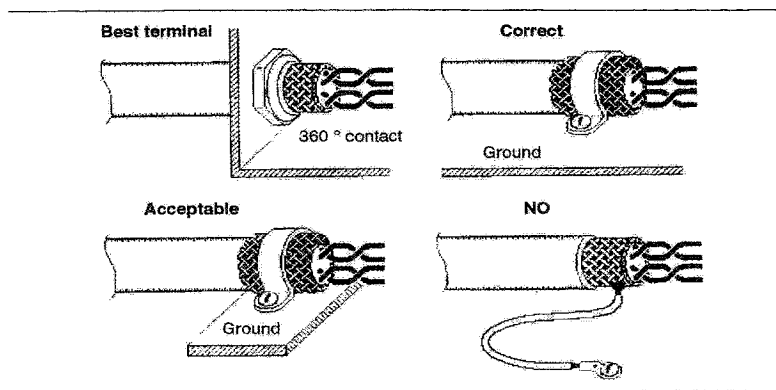


Figura 4: Conexión del coaxial a tierra.

- Terminal de guarda: La misión de la guarda es separar los circuitos sensibles a las interferencias (normalmente de entrada de pequeña señal), de otras zonas de potencial elevado. Para esto se pone una superficie metálica que separe las dos zonas. Normalmente una guarda consiste en una caja metálica que contiene los circuitos sensibles a interferencias. Este blindaje es siempre interno al instrumento.

4. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL:

Las señales de salida de un sensor electrónico (magnitudes eléctricas) son, en muchos casos, demasiado pequeñas o demasiado grandes para conectarlas directamente al instrumento disponible de presentación de resultados. Por lo tanto, se hace necesario amplificar o reducir convenientemente la magnitud de la cantidad medida, de modo que tenga un valor compatible con el instrumento visualización a utilizar (ver figura 5). Además de estos requisitos, siempre deben considerarse los efectos de la impedancia del instrumento, por cuanto ésta puede afectar al valor indicado de la cantidad medida. La perturbación resultante de la inserción de un instrumento de medida, es decir, el dispositivo utilizado para medir corrientes deberá tener una impedancia de lo más baja posible, mientras que para medir tensiones se requiere una impedancia alta.

Normalmente, el acondicionamiento de señal consiste en un circuito electrónico que ofrece las siguientes funciones entre otras: amplificación de la señal, filtrado, adaptación de impedancias, etc.

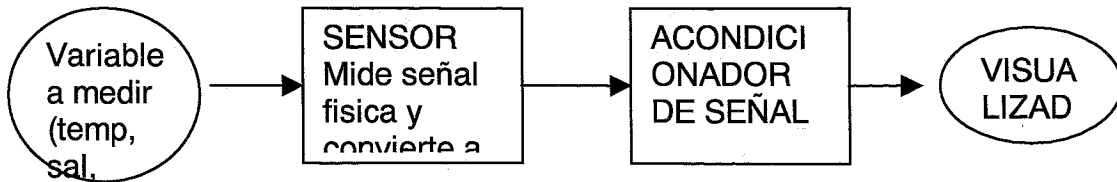


Figura 5: Esquema de bloques de un instrumento de medida.

Adaptación

En algunos sistemas de instrumentación, es necesario asegurarse la transmisión de la máxima cantidad de potencia de la señal de salida de un sensor a un instrumento de presentación o registro. En estos casos es necesario adaptar la impedancia de salida de la fuente de señal y la impedancia de entrada del instrumento. Adaptar significa que la potencia transmitida a la carga sea máxima. Para ello hay que hacer los cálculos para averiguar que resistencia debe tener el instrumento de medida para obtener máxima potencia (normalmente la resistencia del instrumento de presentación debe ser igual a la resistencia de la fuente, $R_L = R_S$). Si la resistencia del instrumento no es la óptima, y la señal de la fuente es alterna es posible adaptar las impedancias de la fuente y del instrumento mediante un transformador.

Escalado de tensión y corriente

Para disminuir la tensión de la señal de salida del sensor, se podrá usar un divisor de tensión (resistivo, capacitativo o inductivo) o un transformador. Así es posible obtener una tensión de salida exactamente con el valor que deseamos.

La mayoría de instrumentos de medida de corriente sólo son capaces de medir directamente miliampers o como máximo unos cuantos ampers. Dado que muchas aplicaciones se emplean corrientes de miles de ampers, el escalado de corriente, será muy importante. Para este fin se puede usar los shunts de corriente o transformadores de corriente.

Atenuadores

Un atenuador es aquel dispositivo que reduce la tensión y/o la potencia transmitida entre los circuitos conectados a sus terminales de entrada y salida, y también presenta una impedancia adaptada a los circuitos de entrada y salida. Hay que tener en cuenta que la atenuación, A , se especifica normalmente como una relación de potencia en términos de decibelios, es decir,

$$A = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_s}{P_i} \text{ dB}$$

Amplificación

La utilización de amplificadores en instrumentación es extensa. Estos dispositivos pueden producir un aumento de la señal de entrada, o efectuar una operación matemática, por ejemplo, diferenciar o integrar las señales, sumar o suprimir, etc.

La ganancia de un amplificador es la relación V_{out}/V_{in} , y se considera convencionalmente como el valor absoluto de este cociente.

Hay que tener en cuenta donde se introduce el amplificador, para aumentar la señal pero no aumentar el ruido.

Filtros

El término filtro se puede aplicar a cualquier dispositivo selector de frecuencias. No obstante, en la práctica se tiende a limitar su uso a la descripción de un componente de un sistema que permite la transmisión de ciertas frecuencias, a la vez que rechaza la transmisión de otras. Las frecuencias transmitidas se denominan 'bandas pasantes' mientras que las rechazadas se conocen como bandas suprimidas.

Los filtros pueden procesar tanto señales continuas (filtros analógicos) como señales muestreadas (filtros digitales).

Los filtros se clasifican según la gama de frecuencias que se transmiten o rechazan. Un filtro *paso bajo* tiene su banda pasante en la zona de las bajas frecuencias, mientras que un filtro *paso alto* permite solo la transmisión de frecuencias altas. Los filtros *pasa banda* y de *rechaza banda* se designan de acuerdo con su capacidad de discriminar en favor o en contra de bandas de frecuencia específicas.

Relación señal a ruido (S/N o SNR)

En todos los instrumentos electrónicos hay ruido generado en su interior. Es por ello que se define la relación señal a ruido como el cociente entre el valor de la señal y el del ruido generado por el propio dispositivo (ver figura 6). Cuanta mayor relación señal a ruido tenga menor cantidad de ruido respecto a la señal. Aunque es una relación de potencias, en general se suele determinar como una relación de tensiones eficaces. Normalmente se expresa en decibelios, es decir,

$$S/N = 20 \log_{10}(V_S/V_N) \text{ dB}$$

Un método para determinar esta relación es medir, con un instrumento adecuado, el valor de la señal más el de ruido, dando

$$V_{\text{total}}^2 = V_{\text{señal}}^2 + V_{\text{ruido}}^2$$

luego se mide el ruido solo, de modo que se puede evaluar la señal.

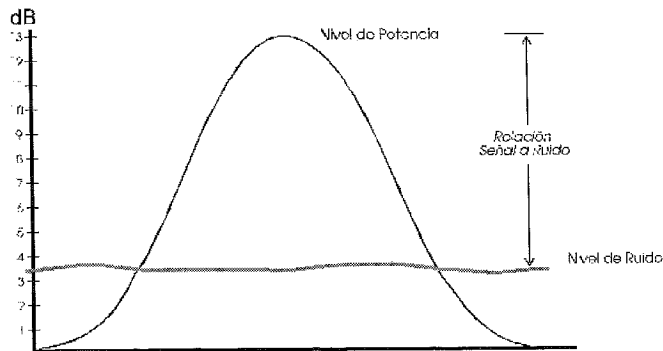


Figura 6: Relación señal a ruido de un dispositivo

Conversores Analógico-Digital

La utilización de visualizadores digitales tiene ventajas indiscutibles sobre los visualizadores analógicos. También para el procesamiento de la señal será mejor usar señales discretas que continuas.

Para convertir una señal de analógica a digital se usará el conversor analógico-digital. Este conversor, primero hará el muestreo de la señal analógica, después estos datos muestreados se cuantificarán y codificarán, dándole unos valores para cada nivel. Finalmente si se desea se puede volver a convertir la señal en analógica.

Muestreo

Cuando se va a representar una señal continua mediante un conjunto de muestras, hay que tener la precaución de asegurar que la velocidad de muestreo sea suficientemente rápida para que todas las variaciones de la señal sean reconstruidas a partir del registro. Si la velocidad de muestreo es demasiado baja, se perderán detalles de la fluctuación de la onda continua. El requisito mínimo para la frecuencia de muestreo es que debe ser como mínimo el doble de la frecuencia máxima de la señal que está siendo muestreada. Esta es la frecuencia de Nyquist.

$$f_{\text{muestreo}} \geq 2 \cdot f_{\text{max_señal}}$$

En la figura 6 se muestra la forma en que se muestrean las señales continuas. Si la señal se ha muestreado a frecuencias iguales o superiores a la Nyquist, posteriormente será sencillo reconstruir la señal analógica.

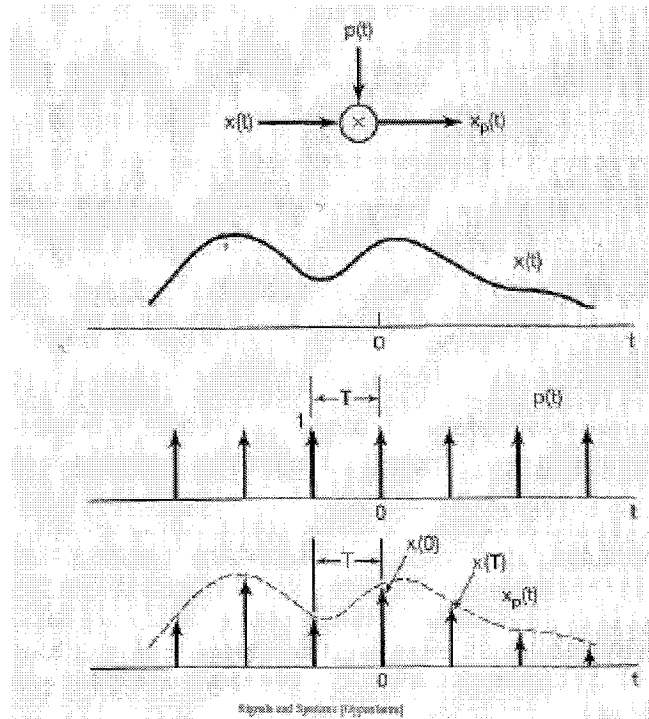


Figura 6: Proceso de muestreo

Cuantificadores / Codificadores

Para procesar y transmitir señales digitales no sólo es necesario muestrear la señal analógica sino también cuantificar la amplitud de estas señales a un número finito de niveles. El tipo más usual de cuantificación es la uniforme, en el que los niveles son todos iguales. La mayoría usan un número de niveles que es una potencia de 2. Si el convertidor es de n bits entonces hay 2^n valores o estados posibles.

La codificación es la representación del valor asignado a la señal, mediante combinación de símbolos que se representan habitualmente con dos niveles de tensión '1' y '0'. La figura 6 muestra una señal sinusoidal y su 'versión digital' mediante un conversor A/D de 3 bits. Así, hay 8 estados de salida, representados por los códigos desde 000 a 111.

Si el conversor A/D tiene b bits y el rango es: IE = inicio escala, FE = fondo de escala, entonces la **resolución del codificador** se calcula como:

$$\text{resolución} = \frac{FE - IE}{2^b}$$

Para el caso de la figura 7, el margen de tensiones de entrada al conversor es de 0-10V, y el conversor es de 3 bits, entonces la resolución será de: 10

$V/8=1.25$ V. Es decir, cada código representa un intervalo de 1.25 V. Entonces para rangos pequeños la resolución será mejor.

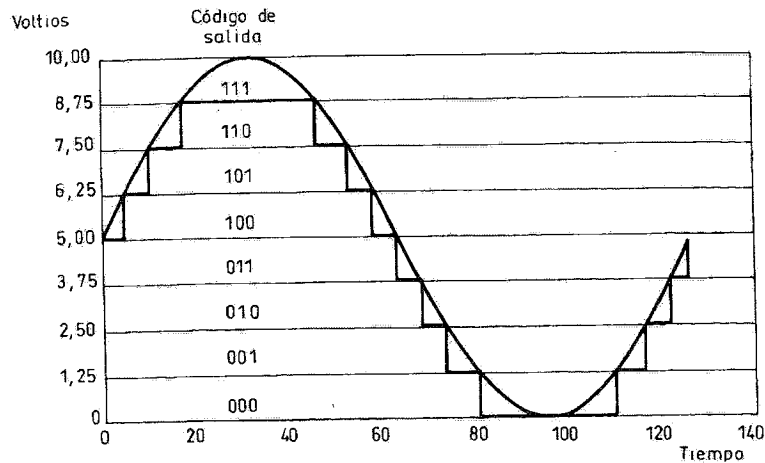


Figura 7: Proceso de cuantificación y codificación

Ruido de cuantificación: Llamaremos $x_s[n]$ a la señal discreta y $x_Q[n]$ a la señal discreta cuantificada. El error es:

$$\varepsilon[n]=x_s[n]-x_Q[n] = \frac{\text{Rango}}{2^{b+1}}$$

En el ejemplo anterior el ruido de cuantificación será $(10/8)/2= 0.625$ V.

Se define la relación señal a ruido de cuantización (SNR_Q) como la relación entre la potencia P_S de la señal y la potencia P_N del error $\varepsilon[n]$, medido en decibelios.

Convertor digital/analógico (DAC en inglés)

En muchos casos puede ser importante que el ordenador que adquiere los datos fije el valor de una acción sobre un proceso por ejemplo, mover una válvula, acelerar o decelerar una bomba centrifuga. El control sobre estos procesos muchas veces es de forma analógica con voltajes o corrientes. Si se quiere llevar el control desde un ordenador, sistema digital, nos hará falta un convertor digital/analógico para poder producir el voltaje o corriente deseado.

Transmisión

Para poder transmitir la información digital adquirida a otro sistema de almacenamiento se utilizan protocolos de comunicación estandarizados. Los protocolos más habituales son de tipo serial, porque permiten mayores distancias de transmisión mientras que en procesos eléctricos se utilizan protocolos de transmisión paralela porque son más rápidos (pero de menor

distancia de transmisión). Como ejemplo, se puede considerar que la interface RS232C (puerto serie), instalada como estándar en los ordenadores tipo PC, permite transmitir a unos 100 metros, mientras que la interface Centronix (puerto de impresora, paralelo de 25 pines) permite transmitir a unos 5 metros.

6. ANÁLISIS DE ESPECIFICACIONES

Los criterios generales para seleccionar el instrumento adecuado se pueden resumir en la siguiente lista:

Escalas

- a) ¿Cuáles son las magnitudes máxima y mínima de los valores a medir?
- b) ¿Es más adecuado un instrumento con una única escala o uno con escalas múltiples?

Exactitud

- a) ¿Cuál es la máxima tolerancia aceptable?
- b) ¿Es consistente la resolución del instrumento con sus errores especificados?

Características de respuesta

- a) ¿Cuál es el tiempo de respuesta aceptable?

Características de salida

- a) ¿Que tipo de presentación hace falta? gráfica, digital.....?

Estabilidad

- a) ¿Cuál es el intervalo de tiempo máximo aceptable entre calibraciones?
- b) ¿Debe funcionar el instrumento desasistido durante períodos largos?
- c) ¿Hay un sistema de calibración incorporado?

Ambiente

- a) ¿En qué márgenes de temperatura, humedad, variaciones de tensión de red..... va a funcionar el instrumento y cómo van a afectar estos factores a los errores?
- b) ¿Hay limitaciones de espacio?
- c) Si el instrumento se va a instalar de forma permanente ¿es necesario que sea accesible para el mantenimiento?

Aislamiento y apantallamiento

- a) ¿Estará sometido a campos electromagnéticos o electrostáticos parásitos?
- b) ¿La señal a medir es flotante o tiene un terminal a tierra?

Fiabilidad

- a) ¿Cuál es el período de vida operativa especificado?
- b) ¿Cuáles son las consecuencias de un fallo?
- c) ¿Hace falta instrumentación duplicada?
- d) ¿Son necesarios recambios especiales?

Ejemplos

Analizaremos las especificaciones de dos instrumentos para medir la conductividad y temperatura del agua, que nos permitirá calcular la salinidad. En esta pagina web se puede encontrar una calculadora para calcular salinidad a partir de estos dos datos:

<http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/Utilities/salcon.html>.

El primer instrumento es el RCM 7/8 de Aanderaa Instruments, que principalmente calcula la velocidad y dirección de la corriente marina, pero también mide conductividad y temperatura. El segundo instrumento es el MicroCat SBE-37 de la empresa americana SeaBird. Está especialmente diseñado para obtener la conductividad y temperatura de la masa de agua.

En este apartado se muestran las hojas de especificaciones de los dos instrumentos anteriores. En la tabla 2 se comparan los instrumentos, a partir de las especificaciones.

	RCM8- Aanderaa		MicroCAT SBE-37	
	Temp.	Cond.	Temp.	Cond.
Nº de rangos	4	3	1	1
Exactitud	±0.05 °C	0.0025 (S/m)	0.002 °C	0.0003 S/m
Resolución *	0.1% rango	0.1% rango	0.0001 °C	0.0001 S/m+
Nº bits del conversor A/D	10 bits		24 bits	
Tiempo de respuesta	12 segundos NO PERFIL		3 segundos	
Frecuencia de muestreo	0.5,1,2,5,10,20,30,60 o 120 minutos		5-32767 segundos	
Profundidad	2000 m-6000 m		7000 m	
Calibración	1 año (para mucha exactitud)		Cada vez que se utiliza	
Derivas (por año)	0.002 °C	0.003 S/m	1-10 *10 ⁻³ °C	6-50*10 ⁻⁴ S/m
Transmisión en tiempo real	NO		SI	

Tabla 2: Comparación de los instrumentos

* La resolución es limitada o bien por el número de niveles que da el conversor analógico-digital o por la variación de 1 en el dígito menos significativo del número resultado. Será el más restrictivo de los dos.

Si calculamos la resolución del RCM 8 para el caso del rango más pequeño (el del ártico), éste será el que tendrá mayor resolución (o sea número menor):

$$\text{Resolución} = \frac{5.62 + 2.64}{2^{10}} \approx 0.1\%(5.62 + 2.64) = 0.008 \text{ °C}$$

RCM 7/8 de Aanderaa Instruments

Page 1 of 7

The specifications of the Vector Averaging Recording Current Meter, RCM 7, are as follows:

Measuring System

Self balancing bridge with sequential measuring of 6 channels and solid state memory. 10-bit binary word for each channel. The channels are:

1. Reference:

A fixed reading to check RCM's performance and identify individual instruments

2. Temperature:

Selectable ranges:

Low range (-2.46 to +21.48°C).

Wide range (-0.34 to +32.17°C).

High range (10.08 to 36.04°C).

Also available (must be specially ordered):

Arctic range (-2.64 to 5.62°C in channel 4).

Sensor type is Thermistor (Fenwall GB32JM19) and accuracy is $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Resolution is 0.1% of range selected and response time is 12 seconds (63%).

3. Conductivity: (optional)

Sensor Type: Inductive Cell 2994

Ranges: 0 — 74 mmho/cm (standard)

24 — 68 mmho/cm (on request)

24 — 36 mmho/cm (on request)

Resolution: 0.1% of range

Calibration Accuracy: ± 0.025 mmho/cm

4. Pressure: (Optional)

Sensor Type: Silicon piezoresistive bridge

Ranges: 100, 500, 1000, 3000, 9000 PSI

0 — 3000 PSI is standard

0 — 9000 PSI available for RCM 8

Accuracy: $\pm 1\%$ of range

Resolution: 0.1% of range

5. and 6. Current Speed and Direction

Vector Averaging, no. of rotor revolutions and direction is sampled every 12 seconds and broken up into North and East components. Successive components are added and recorded as speed and direction. For longer recording intervals than 10 minutes, speed and direction is sampled 50 times per recording interval.

Direction:

Sensor Type: Magnetic compass with needle clamped onto potentiometer ring

Resolution: 0.35°

Accuracy: $\pm 5^\circ$ for speeds from 5 to 100 cm/s, $\pm 7.5^\circ$ for current speeds 2.5 to 5 and 100 to 200 cm/s

Speed:

Sensor Type: Rotor with magnetic coupling

Range: 2 to 250 cm/second

Accuracy: ± 1 cm/s or $\pm 2\%$ of actual speed whichever is greater

Starting Velocity: 2 cm/second

Clock:

Type: Quartz Crystal

Accuracy: Better than ± 2 s/day within 0 to 20°C

Recording Intervals: 1/2, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 60, or 120 min

External Triggering: A 6 volts pulse to terminal activates the instrument.

Recording System:

Type: Data Storing Unit 2990.*

Coding: PDC-4.

Storage Capacity: Maximum 10920 records of all channels (i.e. 75 days with 10 minutes intervals).

Telemetry:

Acoustically: Acoustic carrier keyed on and off.

Frequency: 16384 KHz ± 5 Hz.

Detection Range: Up to 2000 m with unit 3079.

Power:

Battery: 9V, non-magnetic: 63 x 50 x 80 mm

Capacity: 3 Ah, sufficient for 10920 records with 10 minute interval.

External Materials:

Pressure Case: CuNiSi alloy (OSNISIL) and stainless acid proof steel. Epoxy coated Nickel plated bronze and stainless acid proof steel. Epoxy coated

Other Metal Parts:

acid proof steel. Epoxy coated

Mooring:

Spindle for max. 15 mm diameter rope. Gimbal mounting permits 27° deviation between spindle and instrument. Spindle, breaking load 4700 kg.

	RCM 7 2000 m		RCM 8 6000 m	
Depth Capability:	air	water	air	water
Net Weight (kg) in:	13.6	8.8	15.2	10.9
Recording Unit:	12.2	9.5	14.1	11.8
Vane Assembly:				
Dimensions (mm):				
Recording Unit:	495 x 128		520 x 128	
Vane Assembly:		485 x 500		
Overall Size:	540 height x 865 length			
Gross Weight (kg):				
Recording Unit:	18.5		20.5	
Vane Assembly:	20.0		22.0	
Packing:	Plywood cases			
Recording Unit:	190 x 250 x 600 mm			
Vane Assembly:	140 x 520 x 770 mm			

Spares:

A set of recommended spares is supplied free of charge with each instrument (rotor, bearings, O-rings, etc)

* An expanded version, Part No. 2990E, capacity: 4 times the 2990 version is available as an option. Requires Battery 3309, 15 Ah.

Umbral

SBE 37-SM MICROCAT de Sea-Bird Electronics

2:Description of the MicroCAT

Instrument Specifications

SBE 37-SM	Temperature (°C)	Conductivity (S/m)	Optional Pressure
Measurement Range	-5 to +35	0 to 7 (0 to 70 ms/cm)	0 to full scale range
Initial Accuracy	0.002	0.0003 (0.003 ms/cm)	0.15% of full scale range
Typical Stability (per month)	0.0002	0.0003 (0.003 ms/cm)	0.0015% of full scale range
Resolution	0.0001	0.0001	0.002% of full scale range
Sensor Calibration	-1 to +32	0 to 6 ; Physical calibration over the range 2.7 to 6 S/m, plus zero conductivity (air).	Ambient pressure to full scale range in 5 steps
Counter Time-Base	Quartz TCXO, A 2 ppm per year aging; A. 5 ppm vs. temperature (-5 to +30 °C)		
Memory	1024 K byte non-volatile FLASH memory		
Real-Time Clock	Watch-crystal type 32,768 Hz; Corrected for drift and aging by comparison to MicroCAT counter time-base to produce overall A. 5 ppm accuracy (A. 2.6 minutes/year)		

Standard Internal Batteries

6 Ampere-hour pack consisting of six 9-volt lithium batteries (When removed from the MicroCAT, can be shipped without hazardous material restrictions.)

Quiescent Current 10 microamps
Operating Current 40 milliamps max

With Optional External Input Power	8-24 VDC
Quiescent Current	10 microamps
Operating Current	80 milliamps

A/D 24 bits

Power Endurance Materials

More than 100,000 samples
Titanium pressure case rated at 7000 meters

Weight in water 2.8 kg
Weight in air 4.1 kg

For O-ring sizes, see Appendix IV.

3. VISUALIZACIÓN Y/O ARCHIVO

¿Cómo se almacena y/o transfiere la información en un instrumento de medida?

La información de tipo analógica se presenta frente al usuario mediante un voltímetro o amperímetro, según el tipo de medida que se efectúe.

Para almacenar la información analógica, se han empleado los registradores analógicos, prácticamente en desuso hoy en día, aunque aportan una información sinóptica que los sistemas digitales no tienen automáticamente.

Llamamos **bit** a la menor cantidad de información que se puede obtener en cualquier medida. Como se ha visto, no se expresa en unidades de la magnitud medida.

La información se acumula o transfiere en dos formatos esenciales. Uno es el analógico y hoy en día sólo se usa en aplicaciones muy concretas pero aun muy útiles. La segunda hace uso de los sistemas digitales hoy en día disponibles. Consiste en agrupar los bits de información según una codificación establecida, que permita recuperarlos posteriormente. La agrupación más inmediata es la de 8 bits, llamada byte, octeto o palabra.

Una característica esencial de los sistemas digitales, es su arquitectura basada en tres líneas de flujo de información o líneas BUSS. Cada una de ellas puede transportar la información en paralelo. La primera se denomina buss de datos, la segunda es la de direcciones y la tercera el buss de comandos. Así es posible leer un dato en un lugar del circuito y escribirlo, por ejemplo, en otro lugar. Esta estructura es la que opera en todos los ordenadores digitales actuales. La capacidad de miniaturizar los componentes y la velocidad de transferencia de los datos es lo que los diferencia entre sí.

Llamamos **memoria** a un dispositivo capaz de almacenar información digital de forma ordenada. Existen varios tipos de memorias de estado sólido (basadas en la tecnología de los semiconductores). Las más usadas son:

RAM o **memoria de acceso aleatorio** (Random Access Memory), es una estructura electrónica en la cual se pueden escribir de forma organizada los octetos correspondientes a las distintas mediciones y recuperarlos también ordenadamente después. Su contenido se borra al parar el sistema.

ROM o **memoria de sólo lectura** (Read Only Memory), es una memoria que se carga con datos o un programa a nivel de fabricante. Contienen en general las instrucciones que permiten poner en marcha los instrumentos equipados con ellas, ya que al desconectar el sistema, no se borra su contenido.

PROM o **memoria programable de sólo lectura** (Programmable Read Only Memory). En este caso, la programación de una ROM puede hacerse con

herramientas simples. También es irreversible. Un ejemplo de ella son las BIOS de los ordenadores.

EPROM o **memoria ROM programable electricamente** (Electrically Programable Read Only Memory) Un ejemplo de ella son las BIOS de los ordenadores.

Interconexión de equipos

Para conectar entre sí los equipos digitales, se han establecido unos formatos de datos y protocolos de comunicación de muchos tipos. No obstante, hay dos sistemas que son estándar en la mayoría de ellos.

El primero es el **formato RS232C**, de intercomunicación serie. En este formato los datos se transfieren emitiendo y recibiendo los datos, en formato serie, es decir, los bits que conforman los bytes se suceden en el tiempo. Mediante unos bits extras que se añaden al mensaje, se indica si este ha terminado. Se llaman bits de control.

El formato serie RS232C especifica que el nivel de la señal que se transmite debe tener un mínimo de 10 volt positivos en los pulsos positivos y un nivel inferior a -5 volt en los pulsos negativos. de esta forma, queda un margen intermedio entre los -5 volt y los +10 volt que es descartado. De esta forma, no se tienen en cuenta los pulsos de ruido añadidos por interferencias. Los valores normales de diseño son de ± 12 volt.

El segundo es el formato **paralelo Centronix o GPIB**. En este caso los bytes se transmiten con todos los bits a la vez, junto con otros bits de control.

La velocidad de transferencia de los datos se expresa en baudios, es decir, en el número de byts por segundo que fluyen por la conexión. En general, esta es del orden de los miles o millones de byts por segundo, (kbyte/seg o Mbyte/seg).

4. INSTRUMENTOS EN EL MAR

Características generales de los instrumentos para trabajar en el mar

De la comparación de la instrumentación científica que se emplea en un laboratorio con la que debe usarse en el mar, podemos definir una serie de puntos diferenciales importantes.

En primer lugar está la autonomía energética. Los equipos que trabajan en el mar, deben disponer de algún dispositivo que aporte la energía eléctrica necesaria para alimentarlo tanto a nivel de medición como de almacenamiento de datos.

El sistema más empleado como fuente de alimentación son las pilas desechables, especialmente las alcalinas de 1.5 volt. Siguen las de Li, cuya estabilidad de tensión es muy notable hasta el agotamiento total de las mismas, y además poseen una elevada capacidad de corriente. Su inconveniente reside en la peligrosidad que tienen cuando se las sumerge en agua. El Li es el metal alcalino más activo que existe, y su contacto directo con el agua puede provocar explosiones graves además de dañar a los equipos. Su tensión nominal es de 3.67 volt.

Otra característica diferencial entre los instrumentos de laboratorio y los que deben trabajar en el mar es en la capacidad de almacenar datos. El tamaño de la memoria de archivo de datos condiciona tanto la frecuencia de muestreo como la duración total del muestreo.

Finalmente, la diferencia más evidente entre los equipos destinados a trabajar en el mar respecto a los de laboratorio, es la necesidad de poder resistir las condiciones de inmersión durante un cierto tiempo y también la de reducir las dimensiones para facilitar la manipulación.

Las condiciones ambientales dentro del agua del mar implican: aumento de la presión sobre el equipo, a razón de 1 bar cada 10 metros de profundidad; corrosión de los elementos metálicos del equipo. Es preciso usar materiales resistentes a la corrosión y que a la vez resistan la presión externa. Para ello se emplea mayoritariamente el plástico, con limitaciones de presión. Para profundidades en las que la presión supere los 50 bares, es necesario usar equipos fabricados con acero inoxidable del tipo 316-L, o bronce. Actualmente se está empleando con más asiduidad el titanio, difícil de trabajar pero muy ligero y resistente a la corrosión.

Por el hecho de estar sumergidos, los equipos se encuentran a una temperatura bastante más estable que los que se instalan en un laboratorio. El efecto sería parecido a colocar los instrumentos en un ambiente climatizado.

Debe tenerse precaución con la humedad del aire en el momento de cerrar los equipos cuando la humedad y la temperatura son elevadas. La presión parcial del vapor de agua a 25 °C en el aire es muy superior a la que tiene, por ejemplo, a 4 °C-. Un instrumento que se ha cerrado en un laboratorio, con una humedad relativa alta, por ejemplo un 80 % de la de saturación, al colocarlo en estación en un fondo donde la temperatura sea de 4 grados, seguro que condensa agua en el interior. Esta agua condensada, podrá provocar corrosión en los elementos internos y posible destrucción de la pila de alimentación. Para evitar que ocurra esto, se debe colocar un desecante en el interior del equipo

(gel de Silicio, por ejemplo). Se debe tener la precaución de secarlo cada vez que se abra el equipo.

Cuando un equipo debe dejarse dentro del agua, a una profundidad a la que llega una radiación solar importante, es preciso tener en cuenta el crecimiento de organismos sobre el mismo. Se puede recurrir al empleo de sustancias anti-incrustantes en los elementos más delicados (sensores, circuitos de flujo de agua, etc.). Esto condiciona el mantenimiento que se debe hacer sobre el equipo, con todas sus implicaciones de costes asociados. Generalmente se emplean pinturas anti-incrustantes a base de sales de cobre.

Hemos dejado para el final los aspectos de la corrosión.

Cuando dos piezas metálicas de naturaleza distinta se hallan en contacto con un puente salino entre ellas, se produce una oxidación de uno de los metales, depositándose el óxido sobre el otro metal. Se denomina efecto galvánico y equivale a formar una "pila" entre los dos metales. El metal corroído es el más electronegativo de los dos.

Para proteger a los elementos de un instrumento que deban ser metálicos, se recurre a dos estrategias. En primer lugar se les pinta. Si la pintura es adecuada, la protección del metal situado debajo puede ser duradera. En segundo lugar, está el uso de electrodos de castigo. Se trata de fijar sobre el metal a proteger, otro que tenga un potencial electronegativo mayor. Generalmente se emplea el Zn, por su poco precio y apreciable resistencia mecánica. Deben hacer un buen contacto eléctrico con el metal protegido. Es posible calcular la cantidad en gramos de Zn necesarios para proteger un instrumento dado, pero es preferible asegurarse, colocándolo en exceso.

La corrosión también afecta a los sistemas de sujeción del instrumento. Cuando se prevé emplear un equipo dentro del agua de mar durante un tiempo prolongado, es necesario tener en cuenta que no deben estar en contacto dos metales distintos.

Se produce otra corrosión importante cuando el agua que está entre dos elementos no se renueva y uno de ellos es metálico. Debido a las impurezas que posee el metal, al no renovarse el agua, el pH local desciende, provocando la destrucción progresiva del material.

Diseño de anclajes

Empleamos los anclajes para situar uno o varios instrumentos sumergidos en el mar durante un periodo de tiempo prolongado.

En el diseño de los elementos del anclaje, deben tenerse en cuenta tanto los instrumentos de medida como los tramos de línea situados entre ellos y los elementos de unión.

Para obtener un sistema lo más estático posible, se recurre a valores importantes de flotabilidad junto con el lastre adecuado. Una vez planteado el anclaje de forma estática, se consideran las condiciones dinámicas de todo el conjunto, estableciendo un perfil de velocidades del agua del mar que inciden sobre los elementos.

Para obtener una buena aproximación, es conveniente usar alguno de los programas de simulación, que tienen incorporada una base de datos sobre los elementos más usados en los anclajes, que tiene en cuenta el factor de forma de los instrumentos, la capacidad de estirarse de los distintos tipos de líneas al

ser sometidos a tracción, con el fin de asegurar la cota donde quedará cada instrumento. Además informan del esfuerzo a que se someterá cada elemento del anclaje, lo que permite escoger sus características. Debe trabajarse siempre con un factor de seguridad tal que el esfuerzo a que se les somete no supere nunca el 40 ó el 30 % de los valores que da el fabricante como de rotura.

En el caso de los elementos de los cuales no se disponga información, se recomienda realizar un ensayo en un laboratorio de ensayos de solvencia. Este es el caso de emplear líneas de algún material o tamaño que no figure en los programas.

Se recomienda el empleo de ataduras de seguridad entre los puntos de unión más críticos, especialmente si se sospecha de la calidad de alguno de los materiales empleados. Se efectuarán con un cabo de sección suficiente para sujetar el resto de flotabilidad superior que tenga.

Simulación de anclajes

Empleo del programa CALM

APÉNDICE

Oxidación - Reducción

Over the years the definition of oxidation-reduction has been broadened to include processes which involve combinations of atoms in which there is no clearcut transfer of electrons between them. An understanding of this behavior is provided by the concept of electronegativity. According to this concept, each kind of atom has a certain attraction for the electrons involved in a chemical bond. This "electron-attracting" power of each atom can be listed numerically on an electronegativity scale. Fluorine, which has the greatest attraction for electrons in bond-forming situations, is assigned the highest value on this scale. All other atoms are assigned values less than that of fluorine as shown.

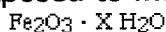
Electronegativity Values of Selected Elements

Metallic Elements			Nonmetallic Elements			
Li (1.0)	Be (1.5)		C (2.5)	N (3.0)	O (3.5)	F (4.0)
Na (1.0)	Mg (1.2)	Al (1.5)	P (2.1)	S (2.5)	Cl (3.0)	
K (0.9)	Ca (1.0)	Sc (1.3)		Se (2.4)	Br (2.8)	

Corrosion

Millions of dollars are lost each year because of corrosion. Much of this loss is due to the corrosion of iron and steel, although many other metals may corrode as well. The problem with iron as well as many other metals is that the oxide formed by oxidation does not firmly adhere to the surface of the metal and flakes off easily causing "pitting". Extensive pitting eventually causes structural weakness and disintegration of the metal. (It should be noted, however, that certain metals such as aluminum, form a very tough oxide coating which strongly bonds to the surface of the metal preventing the surface from further exposure to oxygen and corrosion).

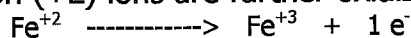
Corrosion occurs in the presence of moisture. For example when iron is exposed to moist air, it reacts with oxygen to form rust,



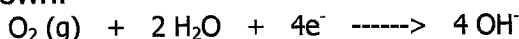
The amount of water complexed with the iron (III) oxide (ferric oxide) varies as indicated by the letter "X". The amount of water present also determines the color of rust, which may vary from black to yellow to orange brown. The formation of rust is a very complex process which is thought to begin with the oxidation of iron to ferrous (iron "+2") ions.



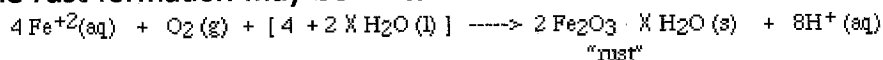
Both water and oxygen are required for the next sequence of reactions. The iron (+2) ions are further oxidized to form ferric ions (iron "+3") ions.



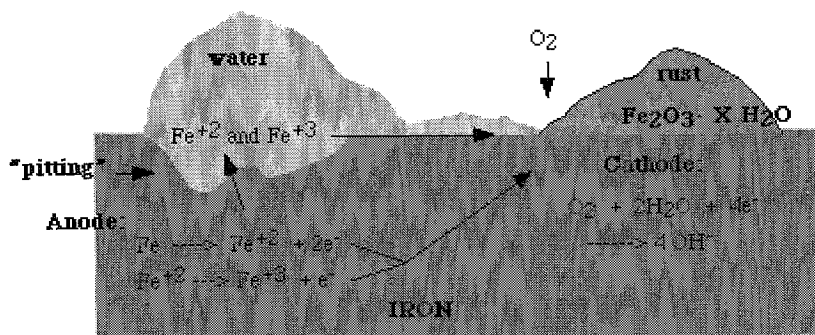
The electrons provided from both oxidation steps are used to reduce oxygen as shown.



The ferric ions then combine with oxygen to form ferric oxide [iron (III) oxide] which is then hydrated with varying amounts of water. The overall equation for the rust formation may be written as :



The formation of rust can occur at some distance away from the actual pitting or erosion of iron as illustrated below. This is possible because the electrons produced via the initial oxidation of iron can be conducted through the metal and the iron ions can diffuse through the water layer to another point on the metal surface where oxygen is available. This process results in an electrochemical cell in which iron serves as the anode, oxygen gas as the cathode, and the aqueous solution of ions serving as a "salt bridge" as shown below.



The involvement of water accounts for the fact that rusting occurs much more rapidly in moist conditions as compared to a dry environment such as a desert. Many other factors affect the rate of corrosion. For example the presence of salt greatly enhances the rusting of metals. This is due to the fact that the dissolved salt increases the conductivity of the aqueous solution formed at the surface of the metal and enhances the rate of electrochemical corrosion. This is one reason why iron or steel tend to corrode much more quickly when exposed to salt (such as that used to melt snow or ice on roads) or moist salty air near the ocean.

Series Electroquímicas

Potenciales de electrodo

Element / Other	Reaction	Electrode Potential (V) (assumptions)
Gold	$\text{Au}^+ + \text{e}^- = \text{Au}$	1.692
Gold	$\text{Au}^{3+} + 3 \text{e}^- = \text{Au}$	1.498
Chlorine	$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^- = 2 \text{Cl}^-$	1.35827
Oxygen, Hydrogen (acid)	$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- = 2 \text{H}_2\text{O}$	1.229
Platinum	$\text{Pt}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Pt}$	1.18
Palladium	$\text{Pd}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Pd}$	0.951
Silver	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	0.7996
Oxygen, Hydrogen (acid)	$\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2$	0.695
Copper	$\text{Cu}^+ + \text{e}^- = \text{Cu}$	0.521
Oxygen, Water	$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- = 4 \text{OH}^-$	0.401
Copper	$\text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Cu}$	0.3419
Hydrogen (acid)	$2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- = \text{H}_2$	0
Iron	$\text{Fe}^{3+} + 3 \text{e}^- = \text{Fe}$	-0.037
Lead	$\text{Pb}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Pb}$	-0.1262
Tin	$\text{Sn}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Sn}$	-0.1375
Oxygen, Water	$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2 + 2 \text{OH}^-$	-0.146
Nickel	$\text{Ni}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Ni}$	-0.257
Cobalt	$\text{Co}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Co}$	-0.28
Cadmium	$\text{Cd}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Cd}$	-0.403
Iron	$\text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Fe}$	-0.447
Chromium	$\text{Cr}^{3+} + 3 \text{e}^- = \text{Cr}$	-0.744
Zinc	$\text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Zn}$	-0.7618
Water	$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- = \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$	-0.8277
Chromium	$\text{Cr}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Cr}$	-0.913
Manganese	$\text{Mn}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Mn}$	-1.185
Titanium	$\text{Ti}^{3+} + 3 \text{e}^- = \text{Ti}$	-1.37
Titanium	$\text{Ti}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Ti}$	-1.63
Aluminum	$\text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^- = \text{Al}$	-1.662
Magnesium	$\text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Mg}$	-2.372
Magnesium	$\text{Mg}^+ + \text{e}^- = \text{Mg}$	-2.7
Sodium	$\text{Na}^+ + \text{e}^- = \text{Na}$	-2.71
Calcium	$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{e}^- = \text{Ca}$	-2.868
Potassium	$\text{K}^+ + \text{e}^- = \text{K}$	-2.931
Lithium	$\text{Li}^{3+} + \text{e}^- = \text{Li}$	-3.0401
Calcium	$\text{Ca}^+ + \text{e}^- = \text{Ca}$	-3.8