



CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

Proyecto Industrial Terminal

"EQUIPO DE INSPECCIÓN POR FUGA DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO".

PARA OBTENER LA ESPECIALIDAD EN
"TECNOLOGO EN MECATRONICA"

PRESENTA

Alumno: Velásquez Cruz Gabriel

Tutor de planta y académico: Julio Cesar Solano Vargas



Ing. Gabriel Velásquez Cruz



006007



QUERETARO, QRO.2010

ÍNDICE.

| | |
|--|-----------|
| TITULO..... | 2 |
| RESUMEN..... | 3 |
| ANTECEDENTES..... | 4 |
| DEFINICIÓN DEL TEMA..... | 5 |
| JUSTIFICACIÓN..... | 6 |
| OBJETIVOS..... | 7 |
| FUNDAMENTOS TEORICOS..... | 8 |
| TECNOLOGIA DE FUGA DE CAMPO ELECTROMAGNETICO..... | 8 |
| IMANES Y MAGNETISMO..... | 10 |
| CAMPO MAGNETICO..... | 12 |
| IMAN PERMENENTE..... | 12 |
| ELECTROIMAN..... | 14 |
| SENSORES..... | 20 |
| SENSOR INDUCTIVO..... | 16 |
| SENSOR DE EFECTO HALL..... | 18 |
| MICROCONTROLADORES..... | 20 |
| MICROCONTROLADOR MSP430 Texas instruments..... | 22 |
| CONSIDERACIONES TECNICAS..... | 36 |
| PROCEDIMIENTO..... | 39 |
| ESTRUCTURA DE PROGRAMA..... | 52 |
| PRUEBAS Y RESULTADOS..... | 60 |
| CONCLUSIONES..... | 63 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 64 |

**“EQUIPO DE INSPECCIÓN POR
FUGA DE CAMPO MAGNÉTICO”.**



RESUMEN

El siguiente documento explica la tecnología de fuga de campo magnético y el desarrollo de un prototipo que utiliza esta tecnología para detectar discontinuidades en placas de material ferromagnético.

Como primera parte se encuentra información sobre los diferentes elementos que se utilizan en dicha tecnología, entre los cuales se encuentran las diferentes maneras de generar un campo magnético, siendo los más comunes el uso de imanes permanentes y electroimanes. También se explica el funcionamiento de los diferentes sensores usados para captar las variaciones de flujo magnético, específicamente se explica el funcionamiento de los sensores inductivos y de efecto hall.

En otra sección se presenta el desarrollo del prototipo, en el cual se utilizaron diferentes componentes electrónicos, como el microcontrolador MSP430F2122 de Texas instruments, además de sensores de efecto hall. Por último se presentan las pruebas y los resultados obtenidos.

ANTECEDENTES

El proyecto de fuga de campo electromagnético surge en el laboratorio de ensayos no destructivos, debido a la necesidad de contar con tecnología de inspección propia. Contribuyendo así al desarrollo de la tecnología y la investigación en nuestro país.

El Laboratorio de ensayos no destructivo (END) forma parte de la gerencia de tecnología de materiales en el centro de ingeniería y desarrollo industrial.

Entre las principales funciones que realiza el laboratorio de ensayos no destructivos es la inspección de recipientes sujetos a presión, Radiografía, Ultrasonido, Líquidos penetrantes, Partículas magnéticas, corrientes de Eddy, entre otras.

DEFINICION DEL TEMA

La tecnología de fuga de campo magnético se ha utilizado para detectar la corrosión y las picaduras de las estructuras de acero, con más frecuencia las tuberías y tanques de almacenamiento.

Cuando un campo magnético está cerca de una placa de acero las líneas o flujo son creadas en la placa. Estas líneas de flujo viajan mejor dentro de la placa que en el aire, este campo puede ser producido por un imán permanente o un electroimán. Este campo magnético creara un flujo de saturación cerca de la placa.

La corrosión y el adelgazamiento de la pared forzaran al flujo magnético a "salir" del material y por lo tanto es detectado mediante un sensor de campo magnético de tipo bobina o el sensor de efecto Hall.

En base en este principio el proyecto tiene como objetivo principal el diseño y fabricación de un prototipo capaz de detectar variaciones en un campo electromagnético debido a zonas de corrosión en placas de metal.

JUSTIFICACION

Debido al alto costo de equipos de inspección por el método de fuga de campo magnético, los cuales están en un precio mayor a los \$350 000.00 aproximadamente, se pretende realizar un prototipo para la inspección con este método con un costo mucho menor. Otra razón muy importante por la cual se desarrolla este prototipo de inspección es el fomento y contribución de tecnología echa en México.

006007

OBJETIVOS

El proyecto tiene como objetivos principales el diseño y fabricación de un prototipo capaz de detectar variaciones en un campo electromagnético debido a zonas de corrosión en materiales ferros magnéticos. Principalmente discontinuidades superficiales y sub-superficiales. Teniendo como base los conocimientos adquiridos en la especialidad de tecnólogo en mecatrónica.

Otro objetivo importantes es el desarrollo de tecnología propia de inspección por medio de el método de "fuga de campo magnético" dentro de este centro de investigación.

FUNDAMENTOS TEORICOS

TECNOLOGIA DE FUGA DE CAMPO ELECTROMAGNETICO

Las técnicas de inspección de fuga de flujo magnético se han utilizado ampliamente en la industria de la inspección de los campos por más de un cuarto de siglo para examinar cañerías, tuberías y revestimientos, nuevos y usados. Pero sólo en los últimos diez años esta técnica de inspección se ha comenzado a utilizar en los pisos de los tanques de almacenamiento en superficie, en un esfuerzo para proporcionar una indicación confiable de las condiciones generales del piso dentro de un período de tiempo económico.

Al mismo tiempo, esta aplicación relativamente nueva de Fuga de flujo magnético trae consigo algunos problemas adicionales que no son evidentes en la inspección de los tubulares, donde ciertos parámetros pueden ser controlados muy estrechamente. Probablemente, lo más notorio de esto es que los pisos del fondo de los tanques nunca son planos, donde los tubulares son por lo general siempre redondos. La capacidad de obtener una información cuantitativa razonablemente consistente se ve seriamente afectada por estos desniveles generales de la mayoría de los fondos de los tanques. La aplicación de criterios rígidos de aceptación y rechazo basados en los umbrales de la amplitud de señal ha probado ser muy poco confiable como información verdaderamente cuantitativa. Se necesita una práctica un poco más realista en la aplicación de esta técnica de inspección y en el diseño del equipo de inspección para garantizar que existan menos incidentes de defectos significativos que no se detectan. En el siguiente documento se resume algunas de las consideraciones principales que necesitan tratarse para hacer inspecciones de los pisos del fondo de los tanques de almacenamiento de superficie que sean confiables, rápidas y económicas. Así cómo explicar los principios básicos del método y de destacar las ventajas, los inconvenientes y peligros.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE EQUIPO

Es vital que el equipo de fuga de flujo magnético fabricado para esta aplicación en particular esté diseñado para manejar los problemas ambientales y prácticos que están siempre presentes. Un equipo diseñado en un laboratorio y probado en condiciones ideales, sin lugar a dudas tendrá deficiencias cuando se lo trate de implementar en la práctica.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Para poder comprender algunos de los problemas relacionados con esta aplicación particular de Fuga de flujo magnético, es necesario entender algunos principios básicos de la técnica. Todo el mundo conoce la habilidad de un imán para "pegarse" a una placa de acero al carbono. Esto sucede debido a que las líneas magnéticas de fuerza (flujo) prefieren viajar a través de la placa de acero al carbono que por el aire circundante. Por cierto, este flujo se resiste a viajar por el aire a menos que se lo fuerce al no tener otro medio de preferencia. A efectos de esta aplicación en particular, se usará un puente magnético para introducir la máxima saturación de flujo como sea posible en el material de inspección entre los polos del puente. Cualquier reducción significativa en el espesor de la placa dará como resultado que una porción del flujo magnético se fuerce al aire en las cercanías del área de la reducción. Se colocarán sensores que pueden detectar estos campos de fuga de flujo entre los polos del puente. La figura 2 ilustra gráficamente este fenómeno.

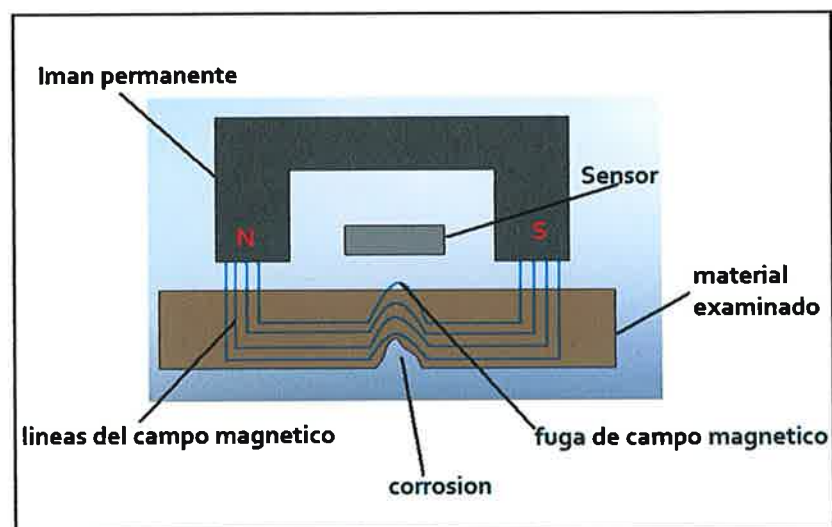


Fig.2.- Detección de fuga de campo electromagnético

En esta técnica se puede utilizar un electroimán o un imán permanente para formar el campo electromagnético, de la misma forma existen diferentes tipos de sensores que pueden ser utilizados en MFL. Los cuales incluyen bobinas, sensores de efecto hall, transductor Magnetostrictivo y dispositivos similares.

Debido a que el método de fuga de campo responde tanto del lado cercano y lejano de la corrosión es necesario introducir un campo magnético fuerte en la superficie del componente. Entre más cercano este el campo para saturar el componente, el método se convierte más sensible.

El tipo de imán usado para generar el campo puede variar. *Los electroimanes* son muy poderosos, pero también se puede utilizar un *imán permanente* de tierras raras. Estos últimos no requieren fuente de poder externa y tienden a ser más ligero en peso, pero no puede ser apagado.

Una ventaja de usar electroimán es que la corriente puede incrementarse para atender un rango más amplio del espesor de la placa, la desventaja es que este necesitas un tamaño y peso más grande, además de que necesita una fuente externa para poder trabajar.

IMANES Y MAGNETISMO

El magnetismo de los imanes

El estudio del comportamiento de los imanes pone de manifiesto la existencia en cualquier imán de dos zonas extremas o *polos* en donde la acción magnética es más intensa. Los *polos magnéticos* de un imán no son equivalentes, como lo prueba el hecho de que enfrentando dos imanes idénticos se observen atracciones o repulsiones mutuas según se aproxime el primero al segundo por uno o por otro polo.

Para distinguir los dos polos de un imán recto se les denomina *polo norte* y *polo sur*

Las experiencias con imanes ponen de manifiesto que polos del mismo tipo (N-N y S-S) se repelen y polos de distinto tipo (N-S y S-N) se atraen. Esta característica del magnetismo de

los imanes fue explicada por los antiguos como la consecuencia de una propiedad más general de la naturaleza consistente en lo que ellos llamaron la «atracción de los opuestos». Otra propiedad característica del comportamiento de los imanes consiste en la imposibilidad de aislar sus polos magnéticos. Así, si se corta un imán recto en dos mitades se reproducen otros dos imanes con sus respectivos polos norte y sur. Y lo mismo sucederá si se repite el procedimiento nuevamente con cada uno de ellos.

Espectros magnéticos

Cuando se espolvorea en una cartulina o en una lámina de vidrio, situadas sobre un imán, limaduras de hierro, éstas se orientan de un modo regular a lo largo de líneas que unen entre sí los dos polos del imán. Lo que sucede es que cada limadura se comporta como una pequeña brújula que se orienta en cada punto como consecuencia de las fuerzas magnéticas que soporta. La imagen que forma este conjunto de limaduras alineadas constituye el espectro magnético del imán. El *espectro magnético* de un imán permite no sólo distinguir con claridad los polos magnéticos, sino que además proporciona una representación de la influencia magnética del imán en el espacio que le rodea.

Así una pareja de imanes enfrentados por sus polos de igual tipo dará lugar a un espectro magnético diferente al que se obtiene cuando se colocan de modo que sean los polos opuestos los más próximos. Esta imagen física de la influencia de los imanes sobre el espacio que les rodea hace posible una aproximación relativamente directa a la idea de campo magnético.

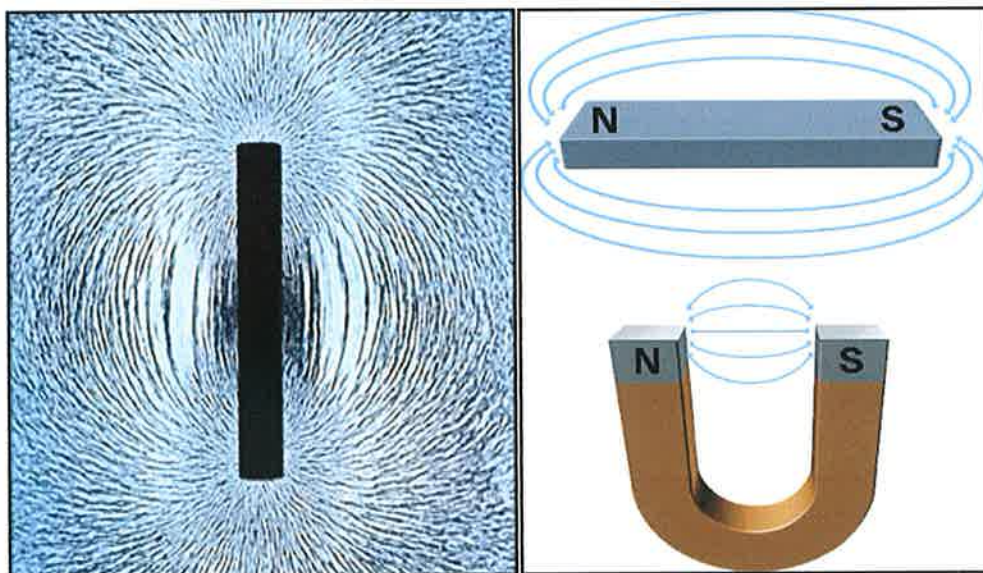


Fig.3.- Espectro electromagnético

EL CAMPO MAGNÉTICO

Las fuerzas magnéticas y la idea física de campo

El hecho de que las fuerzas magnéticas sean fuerzas de acción a distancia permite recurrir a la idea física de campo para describir la influencia de un imán o de un conjunto de imanes sobre el espacio que les rodea. Al igual que en el caso del campo eléctrico, se recurre a la noción de *líneas de fuerza* para representar la estructura del campo. En cada punto las líneas de fuerza del campo magnético indican la dirección en la que se orientará una pequeña brújula (considerada como un elemento de prueba) situada en tal punto. Así las limaduras de hierro espolvoreadas sobre un imán se orientan a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético correspondiente y el espectro magnético resultante proporciona una representación espacial del campo. Por convenio se admite que las líneas de fuerza salen del polo Norte y se dirigen al polo Sur.

IMÁN PERMANENTE

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer al cobalto y al níquel). Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita (Fe_3O_4) o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales.

En un imán la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos. Estos polos se denominan norte y sur, debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos de la Tierra, que es un gigantesco imán natural.

La región del espacio donde se pone de manifiesto la acción de un imán se llama campo magnético. Este campo se representa mediante líneas de fuerza, que son unas líneas imaginarias, cerradas, que van del polo norte al polo sur, por fuera del imán y en sentido contrario en el interior de éste.

Además de la magnetita o imán natural existen diferentes tipos de imanes fabricados con diferentes aleaciones:

- Imanes cerámicos o ferritas.
- Imanes de alnico.
- Imanes de tierras raras.



Fig.4.- diferentes tipos de imanes permanentes.

Imanes cerámicos

Se fabrican a partir de partículas muy finas de material ferro magnético (óxidos de hierro) que se transforman en un conglomerado por medio de tratamientos térmicos a presión elevada, sin sobrepasar la temperatura de fusión.

Imanes de alnico

Se llaman así porque en su composición llevan los elementos aluminio, níquel y cobalto. Se fabrican por fusión de un 8 % de aluminio, un 14 % de níquel, un 24 % de cobalto, un 51 % de hierro y un 3 % de cobre. Son los que presentan mejor comportamiento a temperaturas elevadas. Tienen la ventaja de poseer buen precio, aunque no tienen mucha fuerza.

Imanes de tierras raras

Son imanes pequeños, de apariencia metálica, con una fuerza de 6 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Los imanes de boro/neodimio están formados por hierro, neodimio y boro; tienen alta resistencia a la desmagnetización.

ELECTROIMÁN

Un electroimán es un tipo de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa dicha corriente. Es producido mediante el contacto de dos metales; uno en estado neutro y otro hecho por cables e inducido en electricidad.

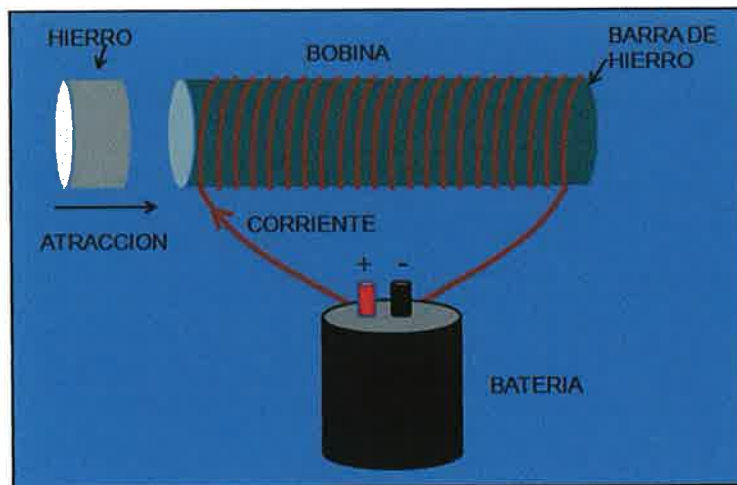


Fig.5.- Electroimán

El tipo más simple de electroimán es un trozo de alambre enrollado. Una bobina con forma de tubo recto de dos formas (parecido a un tornillo) se llama solenoide, y cuando además se curva de forma que los extremos coincidan se denomina toroide.

Pueden producirse campos magnéticos mucho más fuertes si se sitúa un «núcleo» de material paramagnético o ferro magnético (normalmente hierro dulce) dentro de la bobina. El núcleo concentra el campo magnético, que puede entonces ser mucho más fuerte que el de la propia bobina.

Si en un electroimán se quiere variar la densidad magnética, podemos hacer aumentar o disminuir la intensidad de la corriente eléctrica que pasa por el bobinado. Si quisieramos que en un momento dado deje de haber campo magnético, bastara con cortar la corriente.

Para su uso en la industria se construyen electroimanes de la forma que se ve en la Figura 6, llamados electroimanes de tipo herradura.

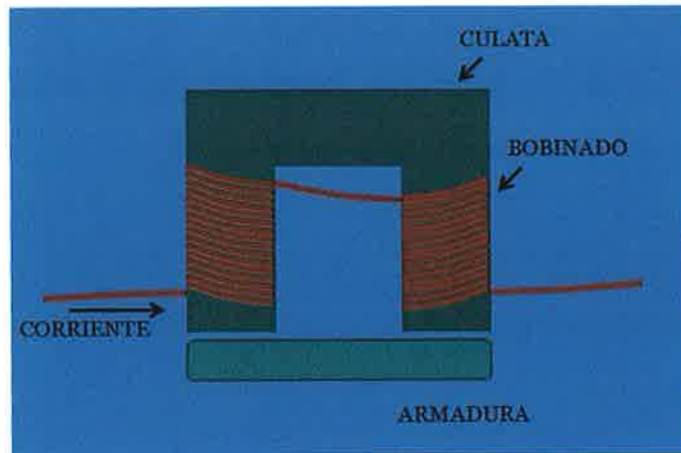


Fig.-6 Electroimán tipo herradura.

Electroimán vs imán permanente

Los imanes potentes de tierras raras están ahora disponibles y son perfectamente adecuados para esta aplicación. Son los más indicados para introducir los niveles necesarios de flujo al material que se está probando. En comparación, los electroimanes son extremadamente voluminosos y pesados. Pero tienen una ventaja en cuanto que su nivel de flujo magnético puede ajustarse fácilmente y hasta "apagarse" si fuera necesario limpiarlos. La altura de los imanes permanentes puede ajustarse para alterar los niveles de flujo pero el puente necesita limpiezas regulares para eliminar los residuos ferrosos.

SENSORES

Hay básicamente dos tipos de sensores siendo utilizados en la actualidad. Sensores de bobina y sensores de efecto Hall. Ambos son capaces de detectar los campos de fuga de flujo ocasionados por la corrosión de los pisos de los tanques. Sin embargo, existe una diferencia fundamental en la manera en que responden a los campos de fuga y en la manera en que generan la respuesta. Existe mucho desacuerdo dentro de la industria en cuanto a cuál es el mejor tipo de sensor para utilizarse en esta aplicación. Los sensores de efecto Hall son indudablemente más sensibles que las bobinas. Sin embargo, en esta aplicación las bobinas son más que

adecuadas, más estables y confiables. Si uno se basa en la experiencia de la industria de inspección de tubulares, se observará que, para las inspecciones de tubos usados, el sensor preferido es aún la humilde bobina. Los sensores de efecto Hall confirmaron ser demasiado sensibles cuando las condiciones de la superficie no son perfectas, lo cual resulta en una inspección poco confiable y la generación de muchas falsas alarmas.

SENSOR INDUCTIVO (BOBINA)

Las bobinas son dispositivos pasivos que siguen la ley de Faraday en la presencia de un campo magnético. A medida que la bobina pasa a través de un campo magnético, se genera un voltaje en la misma y el nivel de este voltaje depende de la cantidad de vueltas del alambre de la bobina y la velocidad del cambio de la fuga de flujo. De esta manera se puede observar que la velocidad tendrá cierta influencia sobre las señales obtenidas con este tipo de sensor.

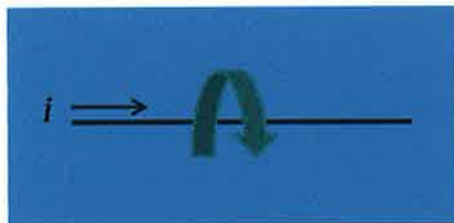


Fig.7.- Una corriente (i) que circula a través de un hilo conductor, genera un campo magnético que está asociado a ella.

Los sensores inductivos contienen un devanado interno. Cuando una corriente circula por el mismo, un campo magnético es generado, que tiene la dirección de las flechas. Cuando un metal es acercado al campo magnético generado por el sensor, éste es detectado.

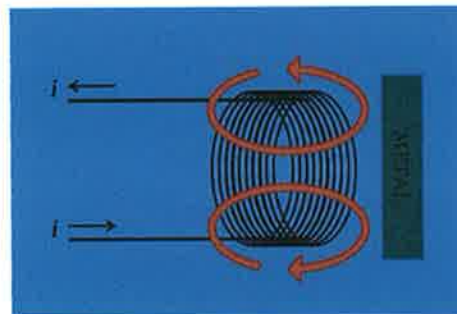


Fig.8.- Cuando un metal es acercado al campo magnético generado por el sensor, éste es detectado.

La bobina del sensor inductivo induce corrientes de Foucault en el material a detectar. Éstas, a su vez, generan un campo magnético que se opone al de la bobina del sensor, causando una reducción en la inductancia de la misma. Esta reducción en la inductancia de la bobina interna del sensor, trae aparejado una disminución en la impedancia de ésta.

La inductancia, es un valor intrínseco de las bobinas, que depende del diámetro de las espiras y el número de ellas. En sistemas de corriente alterna, la reactancia inductiva se opone al cambio del sentido de la corriente

En resumen, el circuito detector reconocerá el cambio en la impedancia de la bobina del sensor (Debido a las corrientes de Foucault inducidas en el objeto a detectar) y enviará una señal al amplificador de salida, el cual cambiará el estado de la misma. Cuando el metal a detectar es removido de la zona de detección, el oscilador podrá generar nuevamente el campo magnético con su amplitud normal. Es en este momento en que el circuito detector nuevamente detecta este cambio de impedancia y envía una señal al amplificador de salida para que sea éste quién, nuevamente, restituya el estado de la salida del sensor.



Fig.9.- Diferentes presentaciones de sensor inductivo

SENSOR DE EFECTO HALL

En el mercado existe gran cantidad de sensores industriales para diversos usos, basados en el efecto que descubrió el científico Edwin Herbert Hall. El nombre de Hall, físico norteamericano, ha pasado a la posteridad debido a una singularidad electromagnética que descubrió por casualidad en el curso de un montaje eléctrico: el "Efecto Hall".

Cuando por una placa metálica circula una corriente eléctrica y ésta se halla situada en un campo magnético perpendicular a la dirección de la corriente, se desarrolla en la placa un campo eléctrico transversal, es decir, perpendicular al sentido de la corriente. Este campo, denominado Campo de Hall, es la resultante de fuerzas ejercidas por el campo magnético sobre las partículas de la corriente eléctrica, sean positivas o negativas.

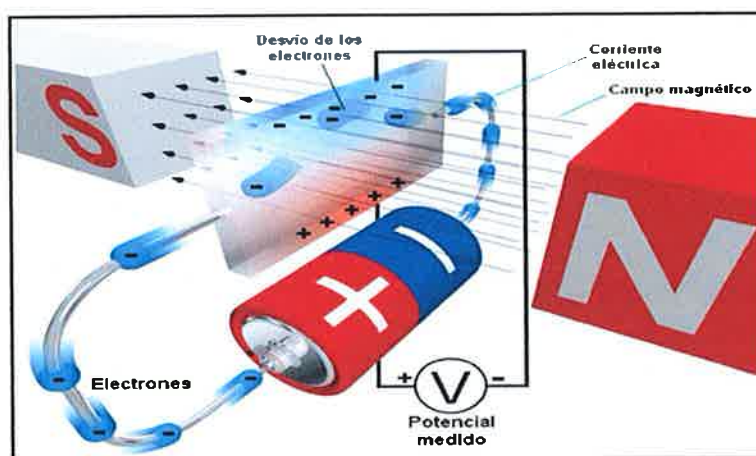


Fig.10.- Efecto hall

Este fenómeno tiene dos consecuencias principales. La primera es que la acumulación de cargas en un lado de la placa, en el campo así creado, implica que el otro lado tiene una carga opuesta, creándose entonces una diferencia de potencial; la segunda es que la carga positiva posee un potencial superior al de la carga negativa. La medida del potencial permite, por tanto, determinar si se trata de un campo positivo o negativo.

En la mayor parte de los metales, la carga es negativa, pero en algunos metales como el hierro, el zinc, el berilio y el cadmio es positiva, y en los semiconductores es positiva y negativa al mismo tiempo.

Hay una desigualdad entre los intercambios negativos y los positivos; también en este caso, la medida del potencial permite saber cuál domina, el positivo o el negativo.

Los sensores basados en efecto Hall suelen constar de un elemento conductor o semiconductor y un imán. Cuando un objeto ferromagnético se aproxima al sensor, el campo que provoca el imán en el elemento se debilita. Así se puede determinar la proximidad de un objeto, siempre que sea ferro-magnético.

Aplicaciones de los sensores Hall

- Mediciones de campos magnéticos (Densidad de flujo magnético)
- Mediciones de corriente sin potencial (Sensor de corriente)
- Emisor de señales sin contacto
- Aparatos de medida del espesor de materiales

Como sensor de posición o detector para componentes magnéticos los sensores Hall son especialmente ventajosos si la variación del campo magnético es comparativamente lenta o nula. En estos casos el inductor usado como sensor no provee un voltaje de inducción relevante.

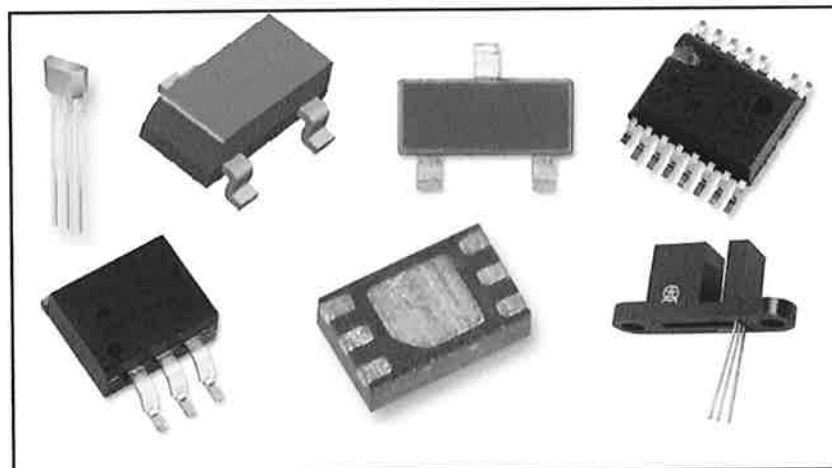


Fig.11.- Diferentes presentaciones de sensor de efecto hall

MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y unidades de E/S (entrada/salida).

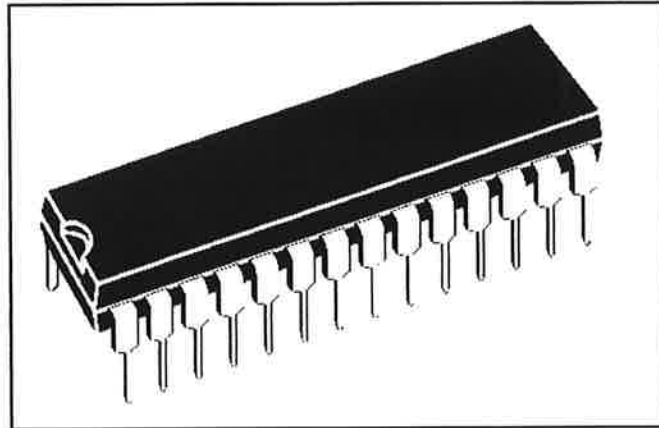


Fig. 12.- Microcontrolador

La principal función de los microcontroladores es interpretar (decodificar) combinaciones de bits (instrucciones) y generar señales digitales internas y/o externas, para ejecutar de manera continua una secuencia de instrucciones (programa) que permita controlar un sistema o subsistema electrónico.

Las principales partes de un microcontrolador son:

ADC

Analogic to Digital Converter (Convertidor analógico digital) se usa para convertir un valor analógico (0 a 5 volts por ejemplo) en uno binario (0's y 1's) para que el μC lo entienda.

PWM

Pulse With Modulation (Modulación por ancho de pulso) es un tren de pulsos (valores de 0 a 5v por ejemplo) que pueden variar su duración ó ciclo de trabajo (duty cycle) de tal manera que el tren de pulsos puede formar un voltaje constante, voltaje nulo o un voltaje promedio. Se usa principalmente para controlar motores de corriente directa.

Puertos

Normalmente se les llama así a cierta cantidad de pines en un micro que se usan en conjunto, por ejemplo, los pines denotados en un micro Texas como P4.0, P4.1, P4.2... P4.7

corresponden al puerto 4 del μ C que estamos usando, que consta de 8 pines en total. Cabe decir que varios de esos pines además de servir como entradas y salidas algunos de ellos presentan otras funciones (por ejemplo algunos pueden usarse para comunicación RS232, I2C, SPI...)

Sistemas embebidos (Embedded systems)

Los sistemas embebidos son sistemas que incorporan microcontroladores (o microprocesadores) para una tarea específica pero que no son “visibles” ni “programables” directamente por el usuario. “Embebido” también quiere decir oculto o escondido. Cuando se usa una computadora, se es consciente de que dentro está un microprocesador. Y cuando usamos un teléfono móvil, un reloj, una calculadora, una lavadora, un cargador de baterías, un equipo de música, etc. No los vemos pero o funcionan con microcontroladores o microprocesadores.

Debugger: Este generalmente es un programa que nos ayuda a verificar las rutinas... instrucción por instrucción, en este caso de un μ C para localizar fallas y corregirlas.

Valores Lógicos: Los valores lógicos siempre han sido 0 y 1, la diferencia radica en que queramos que sea un 0 y un 1, por ejemplo, para los μ C MSP430 de Texas un cero lógico es 0 volts y para un uno lógico es 3 volts.

Compilador: Es un programa que se encarga de traducir un lenguaje a otro lenguaje..., el primero normalmente es un lenguaje que nosotros los mortales podemos programar con algunas instrucciones entendibles y el segundo por lo regular es lenguaje maquina... 0101010101 a más no poder.

Sistema Hexadecimal: Es el que se basa en 16 dígitos... 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F... la calculadora de Windows es excelente para hacer conversiones entre Hexadecimal, Decimal y Binario...

MICROCONTROLADOR MSP430 Texas instruments

El microcontrolador MSP430 incorpora un CPU de 16-bits con arquitectura RISC, diferentes periféricos y un sistema de reloj flexible que se interconectan usando memorias comunes de direccionamiento y datos tipo Von-Neuman. Además incorpora combinación de periféricos digitales y analógicos que ofrecen solución a diferentes aplicaciones de señales mixtas (analógicas y digitales).

Las principales características que incluye la familia MSP430x2xx son:

- Ultra bajo consumo de energía, que extiende la vida de baterías
- Módulos analógicos de alto desempeño para aplicaciones de medición de precisión.
- CPU de 16 bits que desarrolla aplicaciones en fracciones de código sencilla.

Se debe considerar como indispensable y primordial el manejo de registros en los microcontroladores, por lo que se hace especial énfasis en este tema. Explicarlo en texto es un poco complicado, así que mencionaremos su aplicación en un ejemplo.

Vamos a encender un LED. Si usamos un micro Texas hay que manejar un par de registros para llevar a cabo esto.

1.- Necesitamos un puerto, puede ser el que sea, en este caso el puerto 1 del μC MSP430F2122

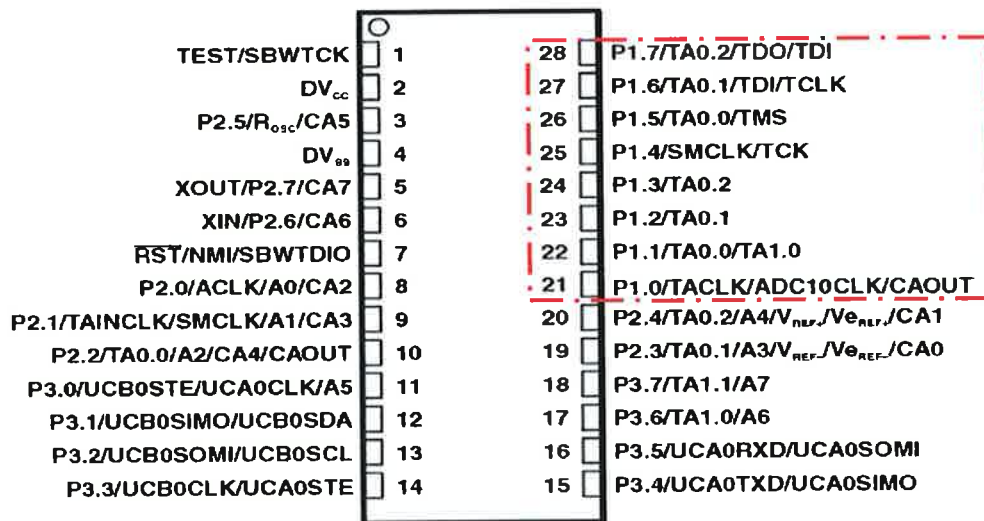


Fig.13.- μC MSP430F2122

2.- Ahora seleccionemos un pin, de igual manera puede ser cualquiera, en este caso fue el P1.2



Fig. 14.- Pin 2 puerto 1

3.- Ahora hay que decirle al puerto 1 que el pin 2 va ser un pin de salida, esto quiere decir que tendrá 3volts de salida. Nos vamos a la hoja de datos (User Guide μ C MSP430F2122), la cual nos dice que PxDIR es un registro de 8 bits que controla las entradas y salidas de x puerto.

Entonces P1DIR controla los pines del puerto 1 como entradas o salidas.

Aquí se muestra la tabla:

| | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| P1DIR | | | | | | | | |
| | P1.7 | P1.6 | P1.5 | P1.4 | P1.3 | P1.2 | P1.1 | P1.0 |

Si nosotros quisiéramos el puerto 1 con los 8 pines de entrada, tendríamos que hacer esto:

| | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| P1DIR | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | P1.7 | P1.6 | P1.5 | P1.4 | P1.3 | P1.2 | P1.1 | P1.0 |

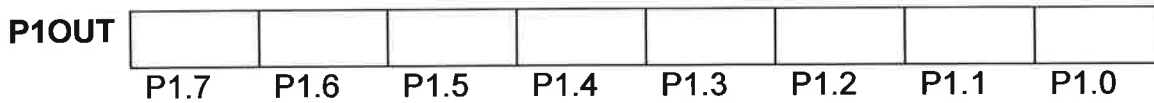
Si nosotros quisiéramos el puerto 1 con los 8 pines de salida, entonces se vería así:

| | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| P1DIR | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | P1.7 | P1.6 | P1.5 | P1.4 | P1.3 | P1.2 | P1.1 | P1.0 |

Y, si solo quisiéramos el pin P1.2 como salida y todos los demás de entrada... entonces este tiene que quedar así:

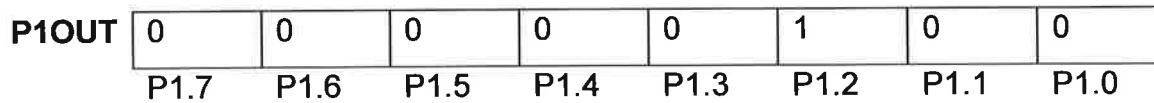
| | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| P1DIR | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | P1.7 | P1.6 | P1.5 | P1.4 | P1.3 | P1.2 | P1.1 | P1.0 |

4.- Ahora tenemos P1.3 como salida pero por si solo no va a hacer nada, hay que decirle que por ese pin “saque” un 1 lógico y para eso, existe un registro que de manera análoga se encarga de hacer eso, para el puerto 1 este sería así:



Donde sí lo llenamos con ceros, a la salida obtendremos 0's lógicos (0 volts) y si lo llenamos de 1's entonces a la salida tendremos unos lógicos (3 volts... suficientes para prender un LED con su resistencia de 330 Ohms en serie).

Entonces... para prender el LED este quedaría así:



Se tiene un 1 lógico a la salida del pin P1.2 listo para prender un LED

Los programas que normalmente se utilizan para programar estos microcontroladores ya sea en ensamblador o en C, son el IAR Embedded WorkBench o el Code Composer Studio, que prácticamente es indiferente programar en uno u otro, sin embargo, para el desarrollo de este prototipo se utilizo el IAR.

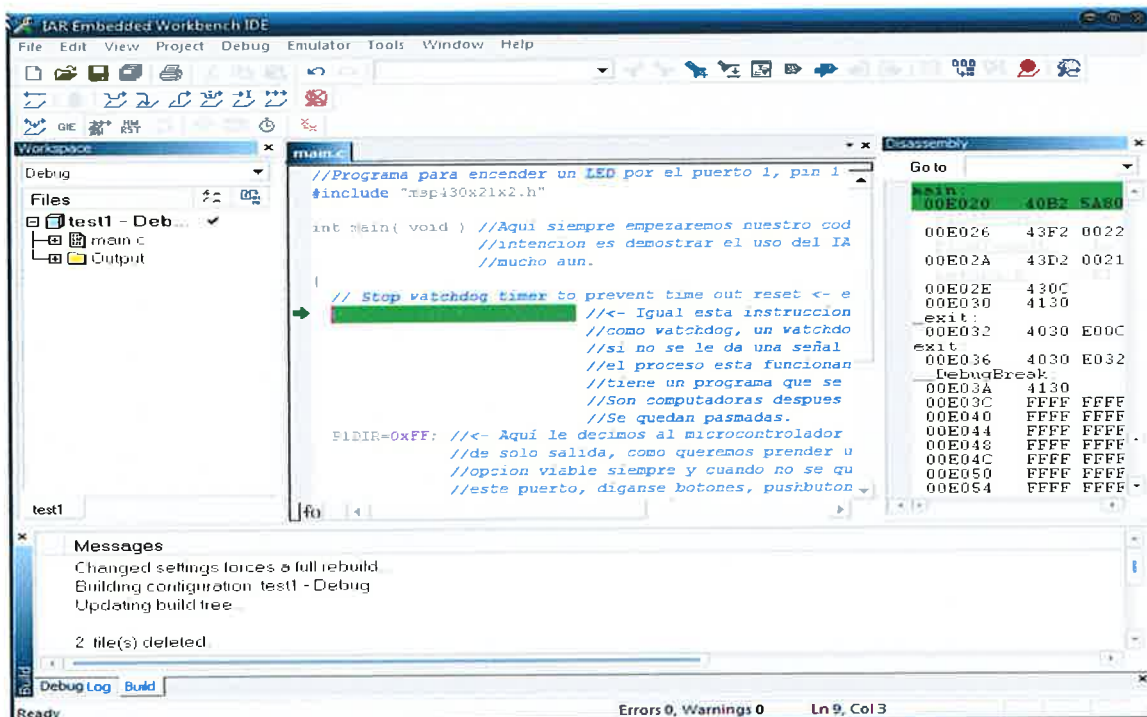


Fig. 15.- Ensamblador IAR Embedded WorkBench

HOJA DE DATOS MSP430F2122

MSP430F21x2 MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLA2878B – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

- Low Supply-Voltage Range, 1.8 V to 3.6 V
- Ultra-Low Power Consumption:
 - Active Mode: 200 μ A at 1 MHz, 2.2 V
 - Standby Mode: 0.7 μ A
 - Off Mode (RAM Retention): 0.1 μ A
- Ultra-Fast Wake-Up From Standby Mode in Less Than 1 μ s
- 16-Bit RISC Architecture, 62.5-ns Instruction Cycle Time
- Basic Clock Module Configurations:
 - Internal Frequencies up to 16 MHz With Four Calibrated Frequencies to $\pm 1\%$
 - Internal Very Low-Power Low-Frequency Oscillator
 - 32-kHz Crystal
 - High-Frequency Crystal up to 16 MHz
 - Resonator
 - External Digital Clock Source
 - External Resistor
- 16-Bit Timer0_A3 With Three Capture/Compare Registers
- 16-Bit Timer1_A2 With Two Capture/Compare Registers
- On-Chip Comparator for Analog Signal Compare Function or Slope Analog-to-Digital (A/D) Conversion
- 10-Bit, 200-kbps A/D Converter With Internal Reference, Sample-and-Hold, Autozero, and Data Transfer Controller
- Universal Serial Communication Interface
 - Enhanced UART Supporting Auto Baudrate Detection (LIN)
 - IrDA Encoder and Decoder
 - Synchronous SPI
 - PC[™]
- Brownout Detector
- Serial Onboard Programming, No External Programming Voltage Needed, Programmable Code Protection by Security Fuse
- Bootstrap Loader in Flash Devices
- On-Chip Emulation Module
- Family Members Include:
 - MSP430F2132
 - 8KB - 256B Flash Memory
 - 512B RAM
 - MSP430F2122
 - 4KB - 256B Flash Memory
 - 512B RAM
 - MSP430F2112
 - 2kB - 256B Flash Memory
 - 256B RAM
- Available in 28-Pin TSSOP and 32-Pin QFN (See Available Options)
- For Complete Module Descriptions, See the *MSP430x2xx Family User's Guide*, Literature Number SLAU144

description

The Texas Instruments MSP430 family of ultra-low-power microcontrollers consists of several devices featuring different sets of peripherals targeted for various applications. The architecture, combined with five low-power modes, is optimized to achieve extended battery life in portable measurement applications. The device features a powerful 16-bit RISC CPU, 16-bit registers, and constant generators that contribute to maximum code efficiency. The digitally controlled oscillator (DCO) allows wake-up from low-power modes to active mode in less than 1 μ s.

The MSP430F21x2 series is an ultra-low-power microcontroller with two built-in 16-bit timers, a fast 10-bit A/D converter with integrated reference and a data transfer controller (DTC), a comparator, built-in communication capability using the universal serial communication interface, and up to 24 I/O pins.



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

All trademarks are the property of their respective owners.

REPRODUCTION OF THIS INFORMATION IS LIMITED BY COPYRIGHT AND OTHER RIGHTS. THIS INFORMATION IS PROVIDED AS IS WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, INCLUDING MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. THIS INFORMATION IS PROVIDED AS IS WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, INCLUDING MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

 TEXAS
INSTRUMENTS

4010 CAMPUS DR. #100000 • DALLAS, TEXAS 75243

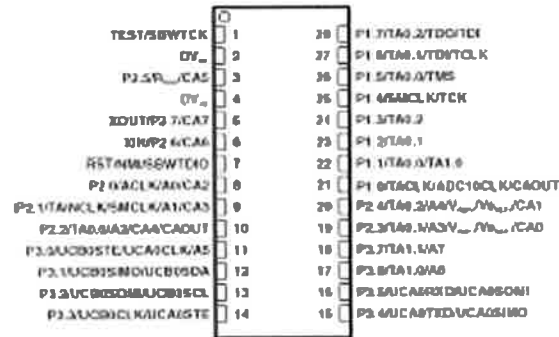
Copyright © 2008, Texas Instruments Incorporated

1

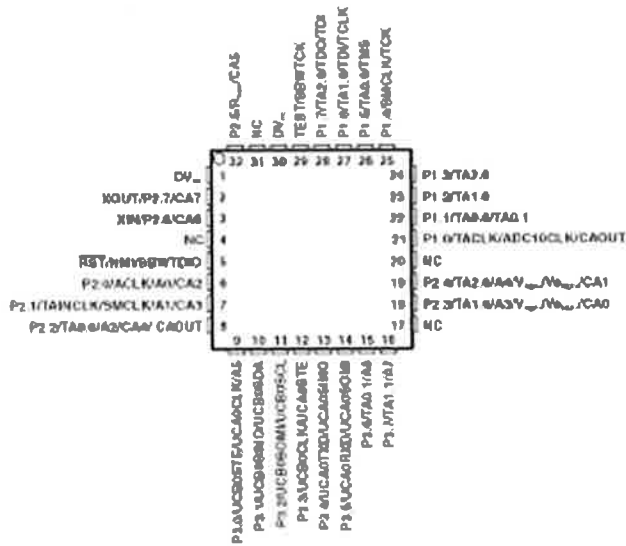
**MSP430F21x2
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER**

SLAS078B – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

pin designation, PW package



pin designation, RHB package



©2007, OFFICE 8001 888888 • DALLAS, TEXAS 75243

MSP430F21x2
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLA087B0 – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

Terminal Functions

| TERMINAL | | | I/O | DESCRIPTION |
|------------------------------------|--------------|---------------|-----|---|
| NAME | 20-Pin PW | 20-Pin R1B | | |
| P1.0TACLK/ ADC10CLK/CACUT | 21 | 21 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 clock signal TACLK input Timer1_A2 clock signal TACLK input ADC10, conversion clock Compensator_A+ output |
| P1.1TAQ0/TA1.0 | 22 | 22 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 capture: CC0CA input, compare: Out0 Output Timer1_A2 capture: CC0CA input |
| P1.2TAQ1 | 23 | 23 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 capture: CC11A input, compare: Out1 Output |
| P1.3TAQ2 | 24 | 24 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 capture: CC0CA input, compare: Out2 Output |
| P1.4SMCLK/TCK | 25 | 25 | I/O | General-purpose digital I/O pin SMCLK signal output Test Clock input for device programming and test |
| P1.5TAQ0/TMS | 26 | 26 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 compare: Out0 Output JTAG test mode select, input terminal for device programming and test |
| P1.6TAQ1/TDI/TCLK | 27 | 27 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 compare: Out1 Output JTAG test data input or test clock input in programming and test |
| P1.7TAQ2/TDO/TDI | 28 | 28 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 compare: Out2 Output JTAG test data output terminal or test data input in programming and test |
| P2.0ACLK/A0/CA2 | 5 | 6 | I/O | General-purpose digital I/O pin ACLK signal output ADC10 analog input A0 Compensator_A+ input |
| P2.1TANCLK/ SMCLK/A1/CA3 | 9 | 7 | I/O | General-purpose digital I/O pin SMCLK signal output Timer0_A3 clock signal TACLK input Timer1_A2 clock signal TACLK input ADC10 analog input A1 Compensator_A+ input |
| P2.2TAQ0/A2/CA4/ CAOUT | 10 | 8 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 capture: CC0CB input, compare: Out0 Output ADC10 analog input A2 Compensator_A+ input Compensator_A+ output |
| P2.3TAQ1/A3/ Vref-, Vrefp-, CA0 | 19 | 18 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 compare: Out1 Output ADC10 analog input A3 / negative reference Compensator_A+ input |
| P2.4TAQ2/A4/ Vref+, Vrefp-, CA1 | 20 | 19 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer0_A3 compare: Out2 Output ADC10 analog input A4 / positive reference Compensator_A+ input |



4010 LINDEN ROAD, DALLAS, TEXAS 75243

5

**MSP430F21x2
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER**

SLAS275B – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

Terminal Functions (continued)

| TERMINAL | | | I/O | DESCRIPTION |
|-----------------------------|--------------|------------------|-----|---|
| NAME | 20-Pin PW | 32-Pin RFB | | |
| XIN/P2.6/CA5 | 6 | 3 | I/O | Input terminal of crystal oscillator General-purpose digital I/O pin Comparator_A+ input |
| XOUT/P2.7/CA7 | 5 | 2 | I/O | Output terminal of crystal oscillator General-purpose digital I/O pin Comparator_A+ input |
| P2.0/UC93STE/ UCAACLK/A5 | 11 | 9 | I/O | General-purpose digital I/O pin USCI_B0 slave transmit enable/USCI_A0 clock input/output ADC10 analog input A5 |
| P2.1/UC93SMD/ UCBCSDA | 12 | 10 | I/O | General-purpose digital I/O pin USCI_B0 slave in/master out in SPI mode, SDA/PC data in I ² C mode |
| P2.2/UC93SOM/ UCBCSCL | 13 | 11 | I/O | General-purpose digital I/O pin USCI_B0 slave out/master in in SPI mode, SCL/I ² C clock in I ² C mode |
| P2.3/UC93CLK/ UCAGSTE | 14 | 12 | I/O | General-purpose digital I/O USCI_B0 clock input/output, USCI_A0 slave transmit enable |
| P2.4/UC93TXD/ UCACSMD | 15 | 13 | I/O | General-purpose digital I/O pin USCI_A0 transmit data output in UART mode, slave data in/master out in SPI mode |
| P2.5/UC93RXD/ UCACSOMI | 16 | 14 | I/O | General-purpose digital I/O pin USCI_A0 receive data input in UART mode, slave data out/master in in SPI mode |
| P2.6/TA1.6/A6 | 17 | 15 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer1_A2 capture: CC10B input, compare: Out0 Output ADC10 analog input A6 |
| P2.7/TA1.7/A7 | 18 | 16 | I/O | General-purpose digital I/O pin Timer1_A2 capture: CC11A input, compare: Out1 Output ADC10 analog input A7 |
| RST/NMI/BEWTDIO | 7 | 5 | I | Reset or nonmaskable interrupt input Spy-B-Wire test data input/output during programming and test |
| TEST:3EWTK | 1 | 29 | I | Selects test mode for JTAG pins on Port1. The device protection fuse is connected to TEST. |
| P2.5/R _{OSC} /CA5 | 3 | 32 | I/O | General-purpose digital I/O pin Input for external resistor defining the DCO nominal frequency Comparator_A+ input |
| DV _{CC} | 2 | 30 | | Digital supply voltage |
| DV _{SS} | 4 | 1 | | Digital supply voltage |
| NC | NA | 4, 17, 20, 31 | | Not connected internally. Connection to V _{SS} is recommended. |
| CPN Pad | NA | NA | NA | CPN package pad (RFB package only). Connection to DV _{SS} is recommended. |



POST OFFICE BOX 655563 • DALLAS, TEXAS 75265

MSP430F21x2 MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLAS070B – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

operating modes

The MSP430 has one active mode and five software-selectable low-power modes of operation. An interrupt event can wake up the device from any of the five low-power modes, service the request, and restore back to the low-power mode on return from the interrupt program.

The following six operating modes can be configured by software:

- Active mode (AM)
 - All clocks are active.
- Low-power mode 0 (LPM0)
 - CPU is disabled.
 - ACLK and SMCLK remain active, MCLK is disabled.
- Low-power mode 1 (LPM1)
 - CPU is disabled.
 - ACLK and SMCLK remain active, MCLK is disabled.
 - DCO's do generator is disabled if DCO not used in active mode.
- Low-power mode 2 (LPM2)
 - CPU is disabled.
 - MCLK and SMCLK are disabled.
 - DCO's do generator remains enabled.
 - ACLK remains active.
- Low-power mode 3 (LPM3)
 - CPU is disabled.
 - MCLK and SMCLK are disabled.
 - DCO's do-generator is disabled.
 - ACLK remains active.
- Low-power mode 4 (LPM4)
 - CPU is disabled.
 - ACLK is disabled.
 - MCLK and SMCLK are disabled.
 - DCO's do generator is disabled.
 - Crystal oscillator is stopped.

MSP430F21x2 MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLAS276B - NOVEMBER 2007 - REVISED MAY 2008

memory organization

| | | MSP430F2112 | MSP430F2122 | MSP430F2132 |
|------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Memory | Size | 2 KB | 4 KB | 6 KB |
| Main: interrupt vector | Flash | 0x1FFF to 0x1FCC0 | 0x1FFF to 0x1FCC0 | 0x1FFF to 0x1FCC0 |
| Main: code memory | Flash | 0x1FFF to 0x1F000 | 0x1FFF to 0x1F000 | 0x1FFF to 0x1E000 |
| Information memory | Size | 256 Bytes | 256 Bytes | 256 Bytes |
| | Flash | 0x10FFF to 0x1000 | 0x10FFF to 0x1000 | 0x10FFF to 0x1000 |
| Boot memory | Size | 1 KB | 1 KB | 1 KB |
| | ROM | 0x0FFF to 0x0C00 | 0x0FFF to 0x0C00 | 0x0FFF to 0x0C00 |
| RAM | Size | 256 B | 512 Bytes | 512 Bytes |
| | | 0x03FF to 0x0000 | 0x03FF to 0x0000 | 0x03FF to 0x0000 |
| Peripherals | 16-bit | 0x01FF to 0x0100 | 0x01FF to 0x0100 | 0x01FF to 0x0100 |
| | 8-bit | 0x00FF to 0x0010 | 0x00FF to 0x0010 | 0x00FF to 0x0010 |
| | 8-bit SFR | 0x000F to 0x0000 | 0x000F to 0x0000 | 0x000F to 0x0000 |

bootstrap loader (BSL)

The MSP430 BSL enables users to program the flash memory or RAM using a UART serial interface. Access to the MSP430 memory via the BSL is protected by user-defined password. For complete description of the features of the BSL and its implementation, see the application report *Features of the MSP430 Bootstrap Loader*, literature number SLAA069.

| BSL FUNCTION | 28-PIN PW PACKAGE PINS | 28-PIN RHB PACKAGE PINS |
|---------------|------------------------|-------------------------|
| Data transmit | 22 - P1.1 | 22 - P1.1 |
| Data receive | 10 - P2.2 | 8 - P2.2 |

flash memory

The flash memory can be programmed via the JTAG port, the bootstrap loader, or in-system by the CPU. The CPU can perform single-byte and single-word writes to the flash memory. Features of the flash memory include:

- Flash memory has *n* segments of main memory and four segments of information memory (A to D) of 64bytes each. Each segment in main memory is 512 bytes in size.
- Segments 0 to *n* may be erased in one step, or each segment may be individually erased.
- Segments A to D can be erased individually, or as a group with segments 0 to *n*. Segments A to D are also called *information memory*.
- Segment A contains calibration data. After reset segment A is protected against programming or erasing. It can be unlocked but care should be taken not to erase this segment if the calibration data is required.

MSP430F21x2 MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLAS278B – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

calibration data stored in information memory segment A

Calibration data is stored for both the DCO and for ADC10 organized in a tag-length-value structure.

| TAGS USED BY THE ADC CALIBRATION TAGS | | | |
|---------------------------------------|---------|-------|--|
| NAME | ADDRESS | VALUE | DESCRIPTION |
| TAG_DCO_80 | 0x10F6 | 0x01 | DCO frequency calibration at $V_{CC} = 3\text{ V}$ and $T_A = 30^\circ\text{C}$ at calibration |
| TAG_ADC10_1 | 0x10DA | 0x10 | ADC10_1 calibration tag |
| TAG_EMPTY | - | 0xFF | Identifier for empty memory areas |

| LABELS USED BY THE ADC CALIBRATION TAGS | | | |
|---|---|------|----------------|
| LABEL | CONDITION AT CALIBRATION / DESCRIPTION | SIZE | ADDRESS OFFSET |
| CAL_ADC_25T85 | INCH ₀ = 0x1010, REP2_0 = 1, T _A = 65°C | word | 0x000E |
| CAL_ADC_25T90 | INCH ₀ = 0x1010, REP2_0 = 1, T _A = 80°C | word | 0x000C |
| CAL_ADC_25VREF_FACTOR | REP2_0 = 1, T _A = 30°C, I _{VREF} = 1 mA | word | 0x000A |
| CAL_ADC_15T85 | INCH ₀ = 0x1010, REP2_0 = 0, T _A = 65°C | word | 0x0008 |
| CAL_ADC_15T90 | INCH ₀ = 0x1010, REP2_0 = 0, T _A = 80°C | word | 0x0006 |
| CAL_ADC_15VREF_FACTOR | REP2_0 = 0, T _A = 30°C, I _{VREF} = 0.5 mA | word | 0x0004 |
| CAL_ADC_OFFSET | External V _{REF} = 1.5 V, F _{ADCTDCCLK} = 5 MHz | word | 0x0002 |
| CAL_ADC_GAIN_FACTOR | External V _{REF} = 1.5 V, F _{ADCTDCCLK} = 5 MHz | word | 0x0000 |
| CAL_BC1_1MHz | - | byte | 0x0007 |
| CAL_DCO_1MHz | - | byte | 0x0006 |
| CAL_BC1_3MHz | - | byte | 0x0005 |
| CAL_DCO_3MHz | - | byte | 0x0004 |
| CAL_BC1_12MHz | - | byte | 0x0003 |
| CAL_DCO_12MHz | - | byte | 0x0002 |
| CAL_BC1_15MHz | - | byte | 0x0001 |
| CAL_DCO_15MHz | - | byte | 0x0000 |

brownout

The brownout circuit is implemented to provide the proper internal reset signal to the device during power on and power off.

digital I/O

There are three 8-bit I/O ports implemented—ports P1 through P3:

- All individual I/O bits are independently programmable.
- Any combination of input, output, and interrupt conditions is possible.
- Edge-selectable interrupt input capability for all eight bits of ports P1 and P2.
- Read/write access to port-control registers is supported by all instructions.
- Each I/O has an individually programmable pullup/pulldown resistor.

The MSP430F21x2 devices provide up to 24 total port I/O pins available externally. See the device pinout for more information.

watchdog timer + (WDT+)

The primary function of the WDT+ module is to perform a controlled system restart after a software problem occurs. If the selected time interval expires, a system reset is generated. If the watchdog function is not needed in an application, the module can be configured as an interval timer and can generate interrupts at selected time intervals.

ADC10

The ADC10 module supports fast, 10-bit analog-to-digital conversions. The module implements a 10-bit SAR core, sample select control, reference generator, and data transfer controller (DTC), for automatic conversion result handling, allowing ADC samples to be converted and stored without any CPU intervention.

Comparator_A+

The primary function of the comparator_A+ module is to support precision slope analog-to-digital conversions, battery-voltage supervision, and monitoring of external analog signals.

Timer0_A3

Timer0_A3 is a 16-bit timer/counter with three capture/compare registers. Timer0_A3 can support multiple capture/compares, PWM outputs, and interval timing. Timer0_A3 also has extensive interrupt capabilities. Interrupts may be generated from the counter on overflow conditions and from each of the capture/compare registers.

| TIMER0_A3 SIGNAL CONNECTIONS | | | | | | | |
|------------------------------|------------|---------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|------------------|
| INPUT PIN NUMBER | | DEVICE INPUT SIGNAL | MODULE INPUT NAME | MODULE BLOCK | MODULE OUTPUT SIGNAL | OUTPUT PIN NUMBER | |
| 28-PIN PW | 32-PIN RHB | | | | | 28-PIN PW | 32-PIN RHB |
| 21 - P1.0 | 21 - P1.0 | TACLK | TACLK | Timer | NA | | |
| | | ACLK | ACLK | | | | |
| | | SMCLK | SMCLK | | | | |
| 9 - P2.1 | 7 - P2.1 | TA1NCLK | INCLK | CCR0 | TA0 | | |
| 22 - P1.1 | 22 - P1.1 | TA0 | OC10A | | | 22 - P1.1 | 22 - P1.1 |
| 10 - P2.2 | 6 - P2.2 | TA0 | OC10B | | | 26 - P1.5 | 26 - P1.5 |
| | | DV _{SS} | GND | | | 10 - P2.2 | 6 - P2.2 |
| | | DV _{CC} | V _{CC} | | | ADC10 (internal) | ADC10 (internal) |
| 23 - P1.2 | 23 - P1.2 | TA1 | OC11A | CCR1 | TA1 | | |
| | | CACUT (internal) | OC11B | | | 23 - P1.2 | 23 - P1.2 |
| | | DV _{SS} | GND | | | 27 - P1.6 | 27 - P1.6 |
| | | DV _{CC} | V _{CC} | | | 19 - P2.3 | 18 - P2.3 |
| | | | | | | ADC10 (internal) | ADC10 (internal) |
| 24 - P1.3 | 24 - P1.3 | TA2 | OC12A | CCR2 | TA2 | | |
| | | ACLK (internal) | OC12B | | | 24 - P1.3 | 24 - P1.3 |
| | | DV _{SS} | GND | | | 28 - P1.7 | 28 - P1.7 |
| | | DV _{CC} | V _{CC} | | | 20 - P2.4 | 19 - P2.4 |
| | | | | | | ADC10 (internal) | ADC10 (internal) |



**MSP430F21x2
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER**

SLAS789 – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

Timer1_A2

Timer1_A2 is a 16-bit timer/counter with two capture/compare registers. Timer1_A2 can support multiple capture/compares, PWM outputs, and interval timing. Timer1_A2 also has extensive interrupt capabilities. Interrupts may be generated from the counter on overflow conditions and from each of the capture/compare registers.

| TIMER1_A2 SIGNAL CONNECTIONS | | | | | | | |
|------------------------------|------------|---------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|------------|
| INPUT PIN NUMBER | | DEVICE INPUT SIGNAL | MODULE INPUT NAME | MODULE BLOCK | MODULE OUTPUT SIGNAL | OUTPUT PIN NUMBER | |
| 25-PIN PW | 32-PIN R1B | | | | | 25-PIN PW | 32-PIN R1B |
| 21 - P1.0 | 21 - P1.0 | TACLK | TACLK | Timer | NA | | |
| | | ACLK | ACLK | | | | |
| | | SMCLK | SMCLK | | | | |
| 9 - P2.1 | 7 - P2.1 | TAINCLK | INCLK | | | | |
| 22 - P1.1 | 22 - P1.1 | TAC | CC0A | CCR0 | TAC | 17 - P3.6 | 15 - P3.6 |
| 17 - P3.6 | 15 - P3.6 | TAC | CC0B | | | | |
| | | DVss | GND | | | | |
| | | DVcc | Vcc | | | | |
| 16 - P3.7 | 16 - P3.7 | TA1 | CC1A | CCR1 | TA1 | 15 - P3.7 | 16 - P3.7 |
| | | CAOUT (internal) | CC1B | | | | |
| | | DVss | GND | | | | |
| | | DVcc | Vcc | | | | |

universal serial communications interface (USCI)

The USCI module is used for serial data communication. The USCI module supports synchronous communication protocols such as SPI (3 or 4 pin) and I2C, and asynchronous communication protocols such as UART, enhanced UART with automatic baudrate detection (LIN), and IrDA. Not all packages support the USCI functionality.

USCI_A0 provides support for SPI (3 or 4 pin), UART, enhanced UART, and IrDA.

USCI_B0 provides support for SPI (3 or 4 pin) and I2C.

MSP430F21x2
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLA527B – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

peripheral file map

| PERIPHERALS WITH WORD ACCESS | | | |
|---|--|--|--|
| ADC10 | ADC data transfer start address ADC memory ADC control register 1 ADC control register 0 ADC analog enable 0 ADC analog enable 1 ADC data transfer control register 1 ADC data transfer control register 0 | ADC10SA ADC10MEM ADC10CTL1 ADC10CTL0 ADC10AEO ADC10AET ADC10DTC1 ADC10DTC0 | 0x015C 0x0154 0x0152 0x0150 0x004A 0x0049 0x0049 0x0048 |
| Timer0_A0 | Capture/compare register Capture/compare register Capture/compare register Timer0_A0 register Capture/compare control Capture/compare control Capture/compare control Timer0_A0 control Timer0_A0 interrupt vector | TACCR2 TACCR1 TACCR0 TACR TACCTL2 TACCTL1 TACCTL0 TACCTL TACIV | 0x0176 0x0174 0x0172 0x0170 0x0166 0x0164 0x0162 0x0160 0x015E |
| Timer1_A2 | Capture/compare register Capture/compare register Timer1_A2 register Capture/compare control Capture/compare control Timer1_A2 control Timer1_A2 interrupt vector | TA1CCR1 TA1CCR0 TA1R TA1CTL1 TA1CTL0 TA1CTL TA1IV | 0x0194 0x0192 0x0190 0x0194 0x0192 0x0190 0x019E |
| Flash Memory | Flash control 3 Flash control 2 Flash control 1 | FCTL3 FCTL2 FCTL1 | 0x012C 0x012A 0x0128 |
| Watchdog Timer | Watchdog timer control | WDTCTL | 0x0120 |
| PERIPHERALS WITH BYTE ACCESS | | | |
| USCI_B0 | USCI_B0 transmit buffer USCI_B0 receive buffer USCI_B0 status USCI_B0 I2C interrupt enable USCI_B0 bit rate control 1 USCI_B0 bit rate control 0 USCI_B0 control 1 USCI_B0 control 0 USCI_B0 I2C slave address USCI_B0 I2C own address | UCB0TXBUF UCB0RXBUF UCB0STAT UCB0IE UCB0ER1 UCB0ER0 UCB0CTL1 UCB0CTL0 UCB0SA UCB0OA | 0x06F 0x06E 0x06D 0x06C 0x06B 0x06A 0x069 0x068 0x011A 0x0118 |
| USCI_A0 (28-pin and 32-pin version only) | USCI_A0 transmit buffer USCI_A0 receive buffer USCI_A0 status USCI_A0 modulation control USCI_A0 baud rate control 1 USCI_A0 baud rate control 0 USCI_A0 control 1 USCI_A0 control 0 USCI_A0 I ² C-A receive control USCI_A0 I ² C-A transmit control USCI_A0 auto baud rate control | UCA0TXBUF UCA0RXBUF UCA0STAT UCA0MCTL UCA0BR1 UCA0BR0 UCA0CTL1 UCA0CTL0 UCA0IFCTL UCA0IRTCTL UCA0ABCTL | 0x0067 0x0066 0x0065 0x0064 0x0063 0x0062 0x0061 0x0060 0x005F 0x005E 0x005D |
| Comparator_A* | Comparator_A port disable Comparator_A control 2 Comparator_A control 1 | CAPD CACTL2 CACTL1 | 0x0058 0x005A 0x0059 |



© 2007 Copyright Texas Instruments, Dallas, Texas 75243

MSP430F21x2
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLAS278B – NOVEMBER 2007 – REVISED MAY 2008

| PERIPHERALS WITH BYTE ACCESS (continued) | | | |
|--|-------------------------------|------------------------------|--------|
| Basic Clock System* | Basic clock system control 3 | BCSCTL3 | 0x0088 |
| | Basic clock system control 2 | BCSCTL2 | 0x0085 |
| | Basic clock system control 1 | BCSCTL1 | 0x0087 |
| | DCO clock frequency control | DCOCTL | 0x0086 |
| Port P3 | Port P3 resistor enable | P3REN | 0x0010 |
| | Port P3 selection | P3SEL | 0x0018 |
| | Port P3 direction | P3DIR | 0x001A |
| | Port P3 output | P3OUT | 0x0019 |
| | Port P3 input | P3IN | 0x0015 |
| Port P2 | Port P2 selection 2 | P2SEL2 | 0x0042 |
| | Port P2 resistor enable | P2REN | 0x002F |
| | Port P2 selection | P2SEL | 0x002E |
| | Port P2 interrupt enable | P2IE | 0x002D |
| | Port P2 interrupt edge select | P2IES | 0x002C |
| | Port P2 interrupt flag | P2IFG | 0x002B |
| | Port P2 direction | P2DIR | 0x002A |
| | Port P2 output | P2OUT | 0x0029 |
| | Port P2 input | P2IN | 0x0025 |
| | Port P1 | Port P1 selection 2 register | P1SEL2 |
| Port P1 resistor enable | | P1REN | 0x0027 |
| Port P1 selection | | P1SEL | 0x0026 |
| Port P1 interrupt enable | | P1IE | 0x0025 |
| Port P1 interrupt edge select | | P1IES | 0x0024 |
| Port P1 interrupt flag | | P1IFG | 0x0023 |
| Port P1 direction | | P1DIR | 0x0022 |
| Port P1 output | | P1OUT | 0x0021 |
| Port P1 input | | P1IN | 0x0020 |
| Special Function | SFR interrupt flag 2 | IFG2 | 0x0003 |
| | SFR interrupt flag 1 | IFG1 | 0x0002 |
| | SFR interrupt enable 2 | IE2 | 0x0001 |
| | SFR interrupt enable 1 | IE1 | 0x0000 |



POST OFFICE BOX 655563 • DALLAS, TEXAS 75265

CONSIDERACIONES DE APLICACIÓN DE TÉCNICAS

El ambiente de la inspección

Para optimizar la efectividad de la inspección es necesario considerar el medio ambiente, y tratar las restricciones físicas impuestas por las condiciones actuales halladas cuando se examinan la mayoría de los pisos de los tanques.

Condiciones meteorológicas

Sin lugar a dudas las condiciones de temperatura y humedad variarán enormemente en los diferentes lugares del mundo. Debe tomarse en consideración el efecto sobre ambos, los operadores y el equipo. Los seres humanos no funcionan bien en condiciones extremas de temperaturas. El uso del equipo no debe esforzarlos demasiado desde el punto de vista físico y mental. En otras palabras, cuanto más simple, confiable y fácil de usar sea el equipo, más confiables serán los resultados de la inspección.

Limpieza

Por su propia naturaleza, la mayoría de los tanques de almacenamiento de superficie son un lugar sucio y a veces polvoriento. Estas condiciones varían ampliamente y dependen de que tanto esfuerzo esté dispuesto a realizar el propietario/operador del tanque para gastar en la preparación de limpieza para el barrido de inspección de la fuga de flujo magnético.

Como mínimo indispensable se requiere de un buen lavado con agua para aflojar los residuos y para eliminar la costra de la superficie de inspección. La superficie no necesita estar necesariamente seca, pero los charcos de agua estancada deben eliminarse. Cuanto más limpio este el piso, mejor será la inspección obtenida.

Condición de la superficie

La corrosión importante de la superficie superior y/o los esfuerzos de pandeo de las placas del piso representan una limitación seria para ambos, la cobertura de las áreas en cuestión y la sensibilidad a conseguirse. Claro que es difícil mejorar esta situación antes de la inspección, y por lo tanto, estas limitaciones deben considerarse cuando se diseña el equipo. La sensibilidad limitada resultante debe ser apreciada por los propietarios u operadores del tanque de los técnicos que realizan la inspección. Cualquier disturbio físico al sistema de barrido a medida que atraviesa la superficie del tanque resultará en una generación de ruido. Cuanto más áspera sea la superficie, mayor será el ruido y la reducción en sensibilidad capaz de conseguirse.



Fig.16.- Diferentes factores influyen en los resultados de inspección por MFL

Limitaciones de cobertura

Es virtualmente imposible cubrir el 100% por medio de esta técnica debido a las limitaciones de acceso físico. El equipo debe diseñarse de manera que se pueda hacer un barrido de inspección lo más cerca posible a las juntas solapadas y al casco.

Obviamente existen compromisos que hacer debido a que la base de las ruedas del escáner es una consideración importante para los pisos que no son perfectamente planos. Se pueden utilizar cabezales de barrido más pequeños en las áreas estrechas para aumentar el área de barrido.

Evaluación cuantitativa de las indicaciones

La fuga de flujo magnético es una herramienta indicativa cualitativa y no cuantitativa, y por lo tanto es un detector confiable de la corrosión en los pisos de los tanques. Debido a las restricciones ambientales y físicas que se encuentran cuando se realizan las inspecciones reales, no es posible obtener una cuantificación confiable. La amplitud por sí sola no es una indicación confiable del espesor restante de la pared debido a que depende más de la pérdida del volumen actual. Los defectos que exhiben varias combinaciones de pérdida de volumen y la verdadera dimensión del espesor de la pared pueden resultar en la misma amplitud de señal.

Y en conjunto con esta relación espacial continuamente cambiante entre los imanes, sensores y superficie de inspección, es absolutamente claro que será virtualmente imposible hacer una evaluación precisa del espesor restante de la pared. Para obtener resultados verdaderamente cuantitativos deberá utilizarse una combinación de ultrasónicos y fuga de flujo.



Fig.17.- Inspección por fuga de campo magnético

PROCEDIMIENTO

El proyecto de fuga de campo magnético consiste en realizar un equipo que pueda detectar corrosión y picaduras en placas de metal ferro-magnético. Principalmente en los suelos de tanques de almacenamiento.

Como ya se explico anteriormente en el capítulo de fundamentos teóricos, se necesita un campo magnético alto para saturar la placa a inspeccionar y así monitorear las variaciones del flujo magnético. Así que se analizaron las partes de las que debe constar el equipo para obtener los resultados requeridos. El equipo necesita de una parte que genere un campo electromagnético alto, un sensor que detecte las variaciones del flujo magnético, un medio en el cual se puedan desplazar tanto el sensor como el generador de campo magnético; para así poder abarcar diferentes aéreas del componente a inspeccionar, y por supuesto la etapa del procesamiento de la señal obtenida del sensor.



Fig.18.- Equipo de inspección por fuga de campo magnético

A continuación se describe el análisis y construcción de las mismas para poder llegar a tener el equipo final de inspección por fuga de campo magnético.

Una de las partes más importantes del equipo es la formación del campo magnético, por ello se analizaron dos opciones: imán permanente y electroimán. Al principio se pensó utilizar un imán permanente ya que parecía ser la opción más viable ya que este no necesita de una fuente externa de alimentación.

Por lo cual se contactaron varios proveedores pero ninguno podía surtir un solo imán permanente con las medidas adecuadas y el suficiente campo para el proyecto, además de que solo vendían por mayoreo (a partir de 500 piezas en adelante) así que la parte del imán permanente quedó por el momento descartada a pesar de que aparentemente era la mejor opción.

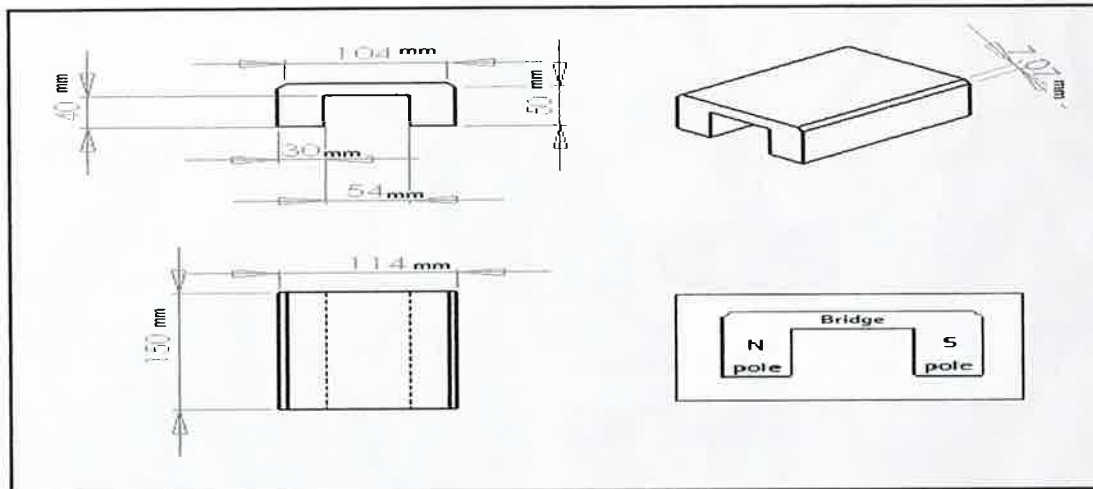


Fig. 19.- Medidas de imán permanente

Descartada la opción del imán se realizó la prueba con un yugo electromagnético, pero la forma en que están contruidos, el tamaño y el campo que producen resulto no ser una opción adecuada para el proyecto.



Fig. 20 Yugo electromagnético.

Entonces se empezaron a realizar pequeños electroimanes para ver que tanto campo podrían producir, se utilizo alambre magneto de diferentes calibres. Así como núcleos de hierro de diferentes formas.

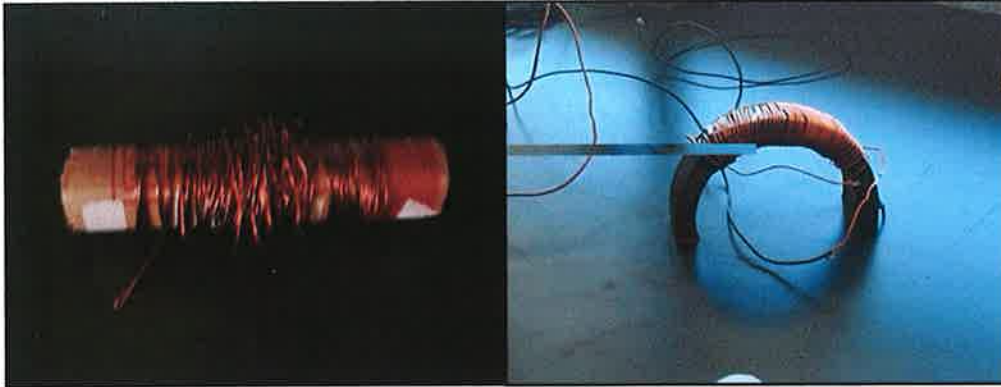


Fig.21.-Alambre magneto y pequeño electroimán en forma de arco

El primero que se realizo fue un electroimán muy robusto en forma de arco, al cual se le adapto el sensor en la parte de en medio, esto para poder captar las variaciones de flujo magnético. El campo generado aun era muy débil y requería de demasiada corriente para ser generado. Por lo que se siguieron haciendo pruebas con otros electroimanes.

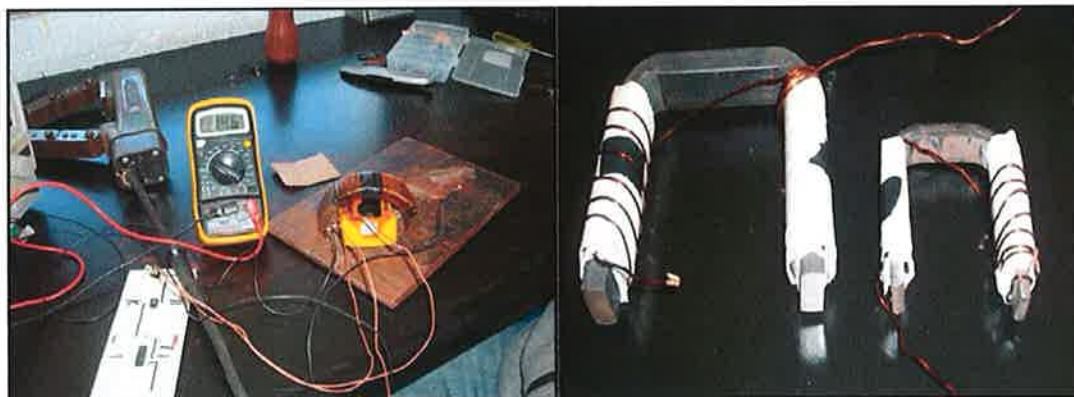


Fig.22.- Electroimanes tipo herradura

Con una idea más concreta se implementaron electroimanes de tipo herradura, los cuales ya presentaban una mejoría en la generación de un fuerte flujo magnético. Estos electroimanes eran aun muy grandes o muy pequeños en tamaño.

Una vez realizadas las anteriores pruebas se procedió a realizar un electroimán final, que fuera capaz de generar un alto grado de campo magnético y que no requiera de tanto voltaje y corriente, además no se calentara tanto.

Se calentó y doblo una barra de hierro de 1 ½" en forma de herradura, en la cual se enrollaron las bobinas con alambre magneto de calibre 22 para producir un campo magnético de gran escala.

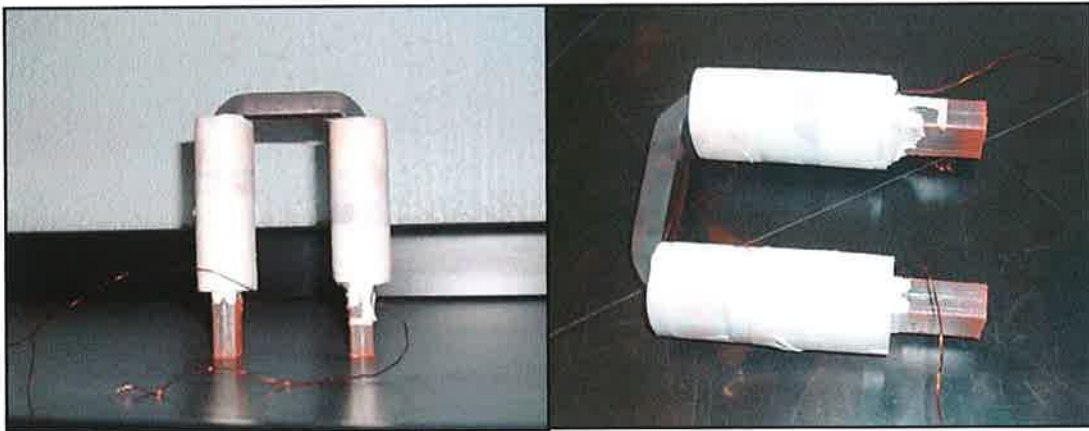


Fig. 23.- Electroimán utilizado en proyecto.

Los electroimanes se construyen en muchas ocasiones para que produzcan una determinada fuerza de atracción. Esta fuerza atractiva se origina al ser aproximada la armadura al núcleo.

En este caso el electroimán tiene un núcleo de hierro y forma de herradura, tiene una longitud de núcleo de 34cm y un espacio en aire de 6.5cm. La sección del núcleo y del espacio del aire es de 8 cm² y la permeabilidad del núcleo es de 1500. La bobina tiene 950 espiras de alambre que conducen una corriente de 3 amperios, entonces tenemos que:

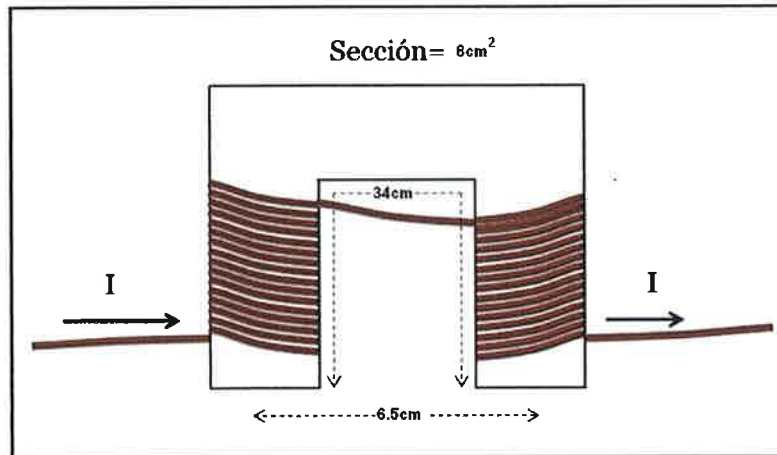


Fig. 24.- Calculo de Electroimán

$$F_{mm} = 0.4\pi NI = 1.259 \times 950 \text{ espiras} \times 3 \text{ amperios} = 3588 \text{ Gibert's}$$

Reluctancia del núcleo,

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{34 \text{ cm}}{1500 \times 8 \text{ cm}^2} = 0.0028$$

Reluctancia del espacio libre

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{6.5}{1 \times 8 \text{ cm}^2} = 0.8125$$

Entonces reluctancia total, $\mathcal{R} = 0.0028 + 0.8125 = 0.8153$

Entonces, el flujo total,

$$\Phi = \frac{F}{\mathcal{R}} = \frac{3588 \text{ gilberts}}{0.8153} = 4,400 \text{ maxwells}$$

Finalmente, densidad de flujo en el espacio aire,

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{4400}{8 \text{ cm}^2} = \mathbf{550 \text{ gauss}}$$

Anteriormente se fabrico un electroimán más pequeño, que nos proporcione 304 gauss, el cual cuenta con 500 espiras y tiene una longitud de núcleo de 19cm y se le aplico una corriente de 3 Amperes, del cual se presentan los sig. Cálculos:

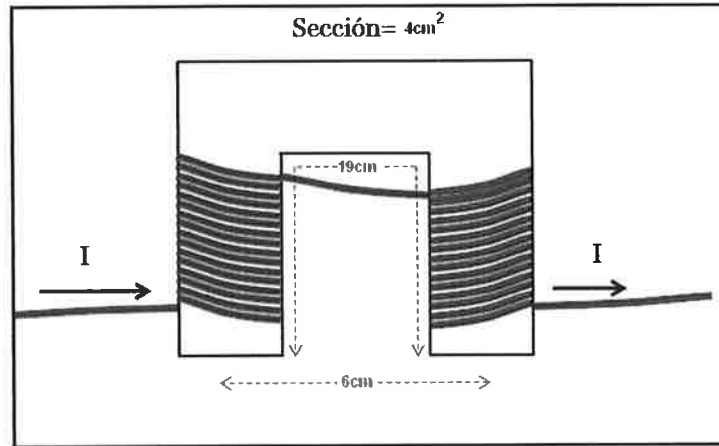


Fig. 25.- Calculo de Electroimán

$$F_{mm} = 0.4\pi NI = 1.259 \times 500 \text{ espiras} \times 3 \text{ amperios} = 1888.5 \text{ Gibert's}$$

Reluctancia del núcleo,

$$R = \frac{l}{\mu A} = \frac{6}{1 \times 4 \text{ cm}^2} = 1.5$$

Reluctancia del espacio libre,

$$R = \frac{l}{\mu A} = \frac{19 \text{ cm}}{1500 \times 4 \text{ cm}^2} = 0.0506$$

$$\text{Entonces reluctancia total, } R = 0.0506 + 1.5 = 1.5506$$

Entonces, el flujo total,

$$\Phi = \frac{F}{R} = \frac{1888.5 \text{ gilberts}}{1.5506} = 1.21 \text{ maxwells}$$

Finalmente, densidad de flujo en el espacio aire,

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{1217}{4 \text{ cm}^2} = \mathbf{304 \text{ gauss}}$$

Otra parte importante es el sensor, ya que es el que se encarga de sensar la fuga del campo generado en el material inspeccionado. Después de analizar las pros y contras se opto por usar el sensor de efecto hall en lugar del sensor inductivo.

Así que se realizaron algunas pruebas con algunos sensores de efecto hall, todo esto para obtener un panorama más claro de su funcionamiento y sensibilidad y así elegir el sensor que usaría en la elaboración del proyecto.

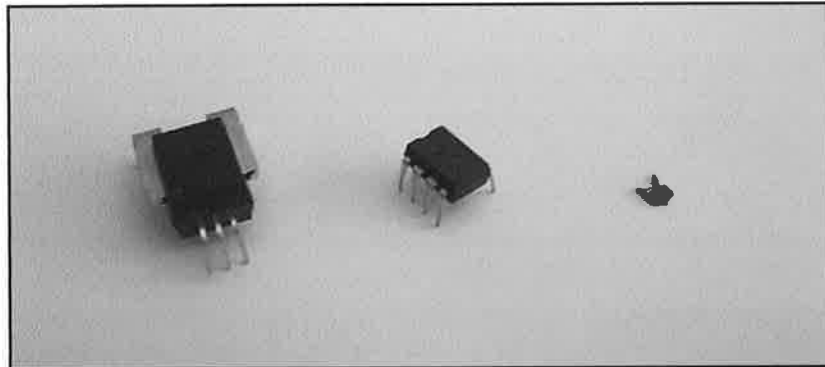


Fig.26.- Diferentes tipos de sensor hall.

Estas pruebas se realizaron con un imán permanente redondo perforado de neodimio, uno de los imanes más potentes en la actualidad.

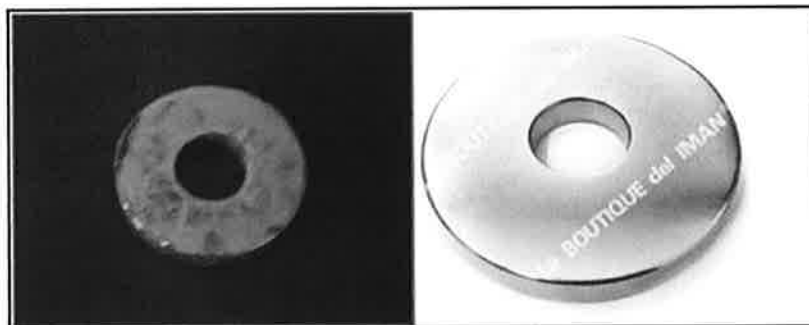


Fig.27.- imán permanente de neodimio

Una vez elegido el sensor que en este caso fue el *Allegro MicroSystems A1322* se realizaron diferentes pruebas, para ver su funcionamiento y requerimientos como corriente y voltaje de trabajo.

Aplicando un voltaje constante de 5 volts al sensor hall, sin ningun campo magnetico cercano, el voltaje de salida en el sensor sera la mitad del voltaje de entrada en este caso sera de 2.5V

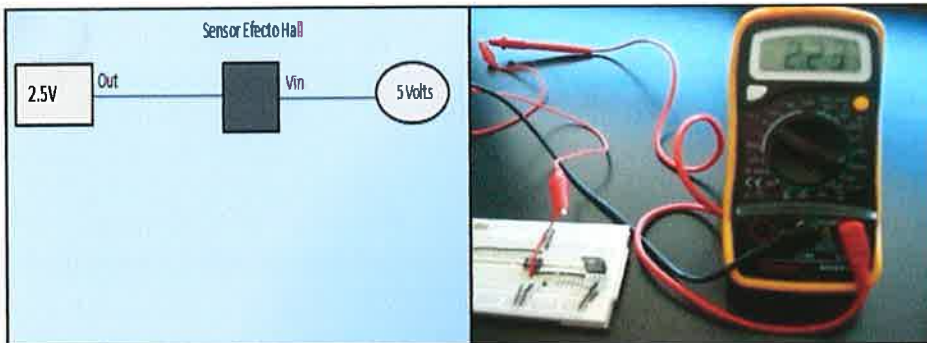


Fig. 28.- mientras no se encuentre un presente ningún campo magnético el valor de la salida será la mitad del voltaje de entrada del sensor

Una vez que un campo magnético es aplicado, dependiendo de polarización el voltaje de salida aumentara o disminuirá, esto debido al efecto hall.

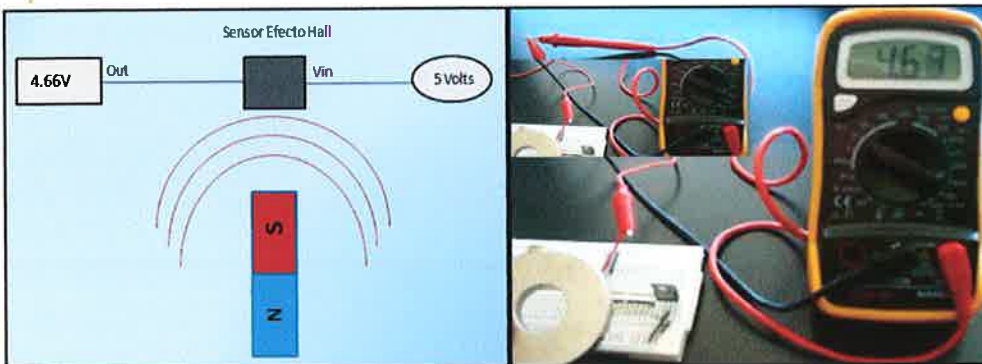


Fig.29.- Al acercar el imán permanente en su campo sur el voltaje aumenta aproximándose a los 5 volts de entrada.

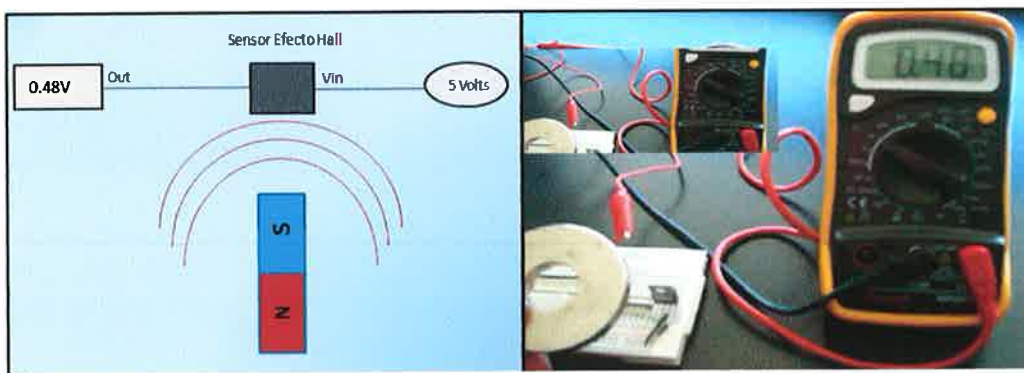


Fig.30.- Al acercar el imán permanente en su campo norte el voltaje disminuye aproximándose a los 0 volts.

También se realizaron pruebas con los electroimanes y placas de acero, para ver si sufría alguna variación al pasar por una discontinuidad.

Una base firme y solida donde se pudiera colocar el sensor y el electroimán era muy necesaria, ya que sin ella las pruebas podían dar resultados erróneos, así que se procedió a construir tal base. Se cortó una placa de aluminio, se le colocaron unas llantas para que el sistema pueda ser movido con mayor facilidad y no interrumpir la inspección.



Fig.31.- placa donde será colocado sensor y electroimán.

Una vez armada la base se procedió a perforar de tal manera que en ella se pudiera instalara el sensor hall y el electroimán.

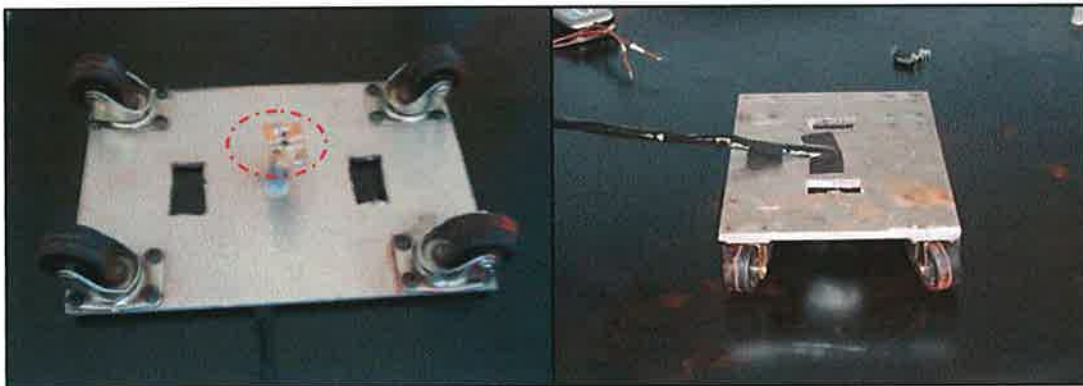


Fig. 32.- ubicación de sensor en placa

Después de armado el sistema, se procedió a realizar las pruebas finales para ver el funcionamiento del electroimán y el sensor ante las posibles discontinuidades.

Cabe señalar que también se fabrico una placa de referencia, en la cual se realizaron las pruebas del equipo. Esta placa cuenta con 4 barrenos a diferentes profundidades y distancias, esto para ver la sensibilidad del equipo y comprobar que realmente está encontrando la fuga de campo magnético.

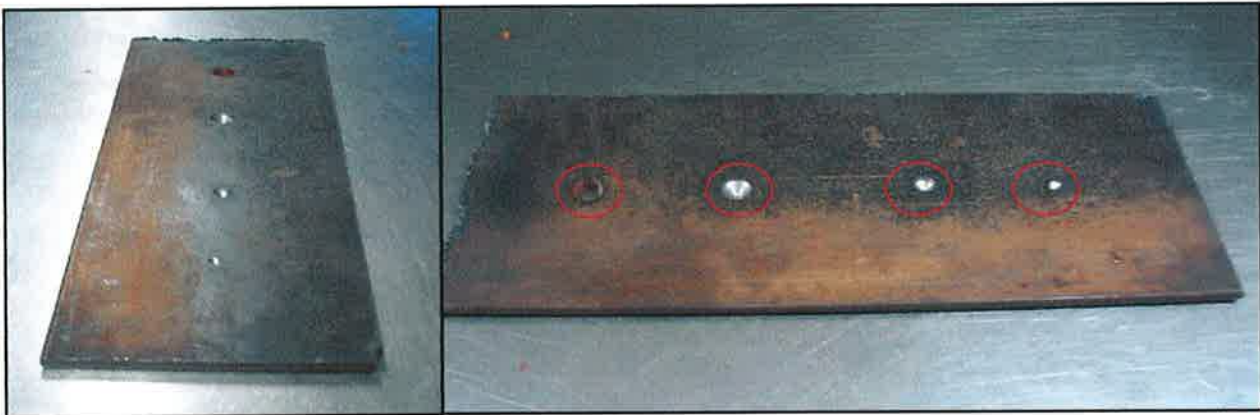


Fig. 33.- placa de referencia para prototipo

Listo el equipo y la placa se procedió a realizar las pruebas, se conecto el sensor a un voltaje de 5V, el electroimán a una corriente de 2A y un voltaje de 10V, cabe señalar que este voltaje y corriente pueden variar dependiendo de que tanto campo se quiera crear en la palca.

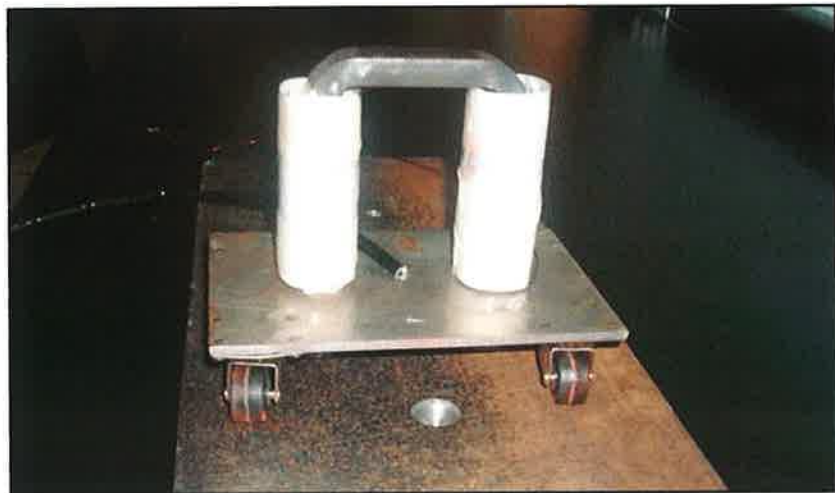


Fig. 34.- Pruebas realizadas en placa de referencia.

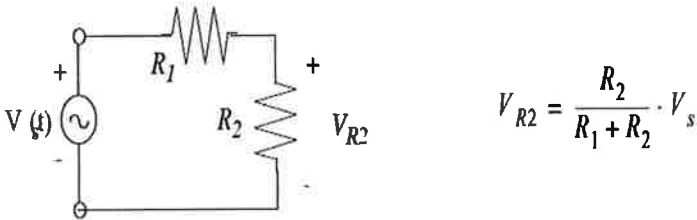
Se inspecciono la placa con el equipo, primero se midió el voltaje del sensor en una parte sana de la placa obteniendo 2.36V de salida, una vez cerca de la primera discontinuidad el voltaje de salida aumento a 2.42V, en la segunda vario a 2.44V al igual que en la tercera discontinuidad, en la cuarta perforación el voltaje de salida fue de 2.55V. Comprobando así el funcionamiento del equipo, el cual pudo detectar las discontinuidades de la placa de calibración.

Una vez comprobado el funcionamiento del equipo en su parte analógica, había que procesar la señal obtenida del sensor para que este al encontrar una variación de voltaje debido al flujo magnético en la placa, active una alarma sonora, que nos indicara de una posible discontinuidad en la placa inspeccionada.

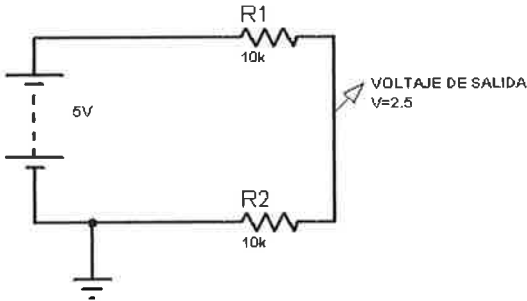
Para el procesamiento de la señal se ocupo el microcontrolador MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER MSP430F2122 de Texas instruments, dicho microcontrolador trabaja con un voltaje de 5volts, y el puerto de conversión analógico a digital con una señal de 2.5V.

El sensor nos entrega una señal analógica que varía de 0.4V como min y hasta unos 4.5V, así que se tuvo que adaptar la señal para que esta pudiera ser referenciada al micro.

Para esto se utilizo un divisor de tensión, el cual se calcula de la siguiente manera:



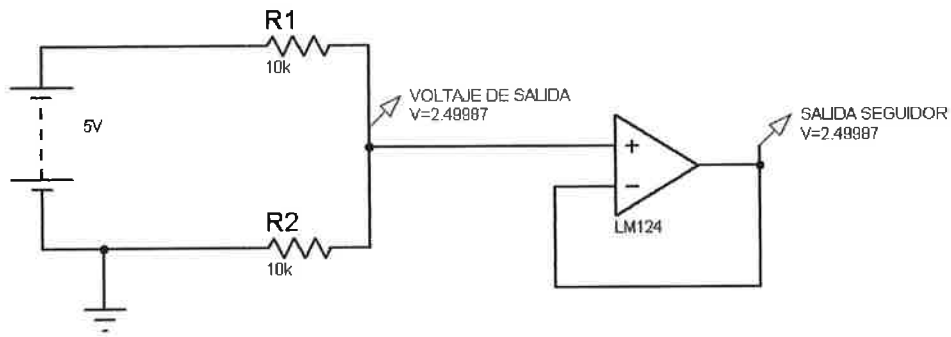
Sustituyendo en la formula tenemos:



$$V_{R2} = \frac{10K\Omega}{10K\Omega + 10K\Omega} * 5V$$

$$V_{R2} = 2.5V$$

Un circuito seguidor fue conectado a este voltaje de salida del sensor, esto para adaptar las impedancias y para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles. Se utilizó el amplificador operacional LM124 de NATIONAL SEMICONDUCTOR.



Esta señal que es la mitad de la señal del sensor es la que convertiremos a digital mediante el microcontrolador, para esto necesitamos darle las instrucciones al micro mediante un programa.

El programa se elaboró mediante el entorno IAR Embedded workbench IDE y se presenta a continuación al igual que el diagrama de conexión y flujo del programa utilizado.

Como se explicó anteriormente se calculó las resistencias del divisor de voltaje, que reduce el voltaje del sensor a la mitad. Después este voltaje es ingresado al microprocesador.

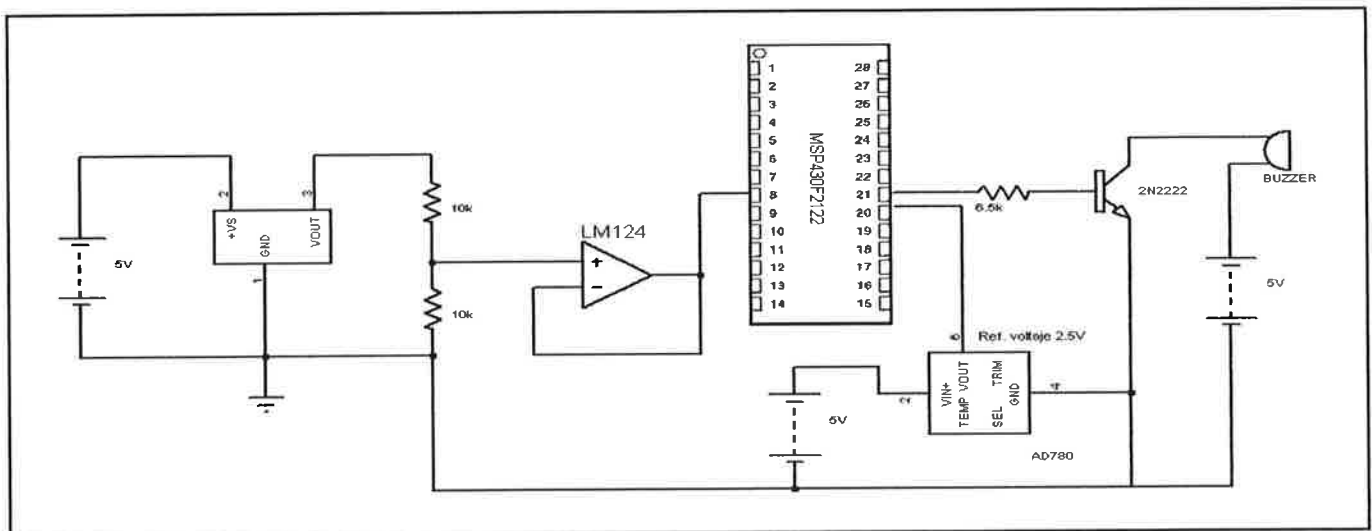


Fig. 35.- Diagrama de conexión de microcontrolador

La señal analógica proveniente del sensor es ingresada al microcontrolador, el cual tiene una referencia externa de 2.5 volts, esta referencia nos sirve para que el convertidor analógico-digital solo trabaje en este rango. Una vez convertida la señal del sensor es almacenada en la memoria del ADC, dicha señal es comparada con un valor constante, este valor es determinado por el tipo de material y el flujo magnético que se le este aplicando a la placa, este valor es igual al voltaje de salida del sensor al momento que no existe ninguna discontinuidad en la placa cuando es magnetizada.

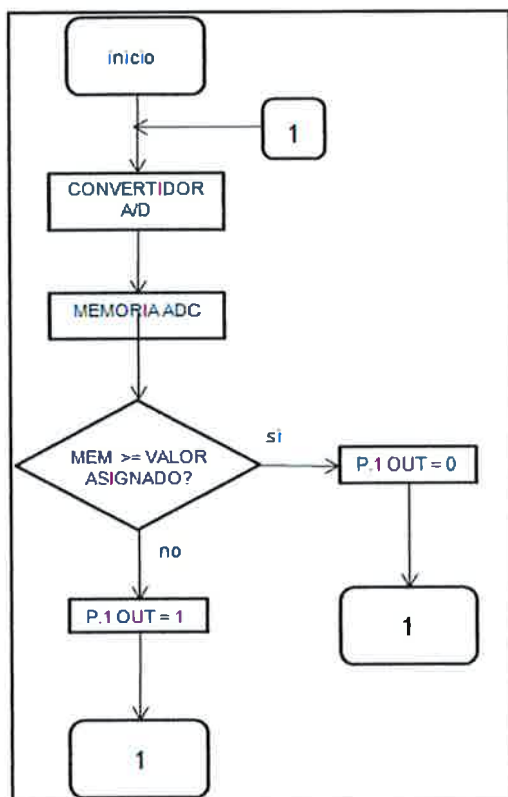


Fig.36.- Diagrama de flujo de programa

Al comparar el valor de la señal del sensor con el valor establecido, si la señal del sensor es igual o mayor que el valor establecido quiere decir que no se ha encontrado ninguna discontinuidad, pero si por lo contrario al comparar estos valores y detectar que el valor del sensor es menor que el valor ya establecido, nos quiere decir que en ese punto hay una posible discontinuidad.

Al detectar esta variación se activara un pulso en la salida en el P1.0, dicho pulso es el que activara la alarma, en este caso el zumbador piezoeléctrico.

ESTRUCTURA DE PROGRAMA

A continuación se presenta el programa creado en el IAR.

```
*****
#include "msp430x21x2.h"

int main( void )
{
// Stop watchdog timer to prevent time out reset
WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;
  ADC10CTL1 = INCH_0 + ADC10DIV_0;
// ADC0 + clk dividido entre 0 para este clk (sin prescaler)

  ADC10CTL0 = SREF_2 + ADC10SHT_3 + REFON + ADC10ON + ADC10IE + ADC10SR;
// Referencia Vref+ para Vref+ y VSS para Vref- (un pin sin cableado) +
// Ciclos de reloj para 'sample and hold' provenientes del ADC10CLK +
// Generador de referencia encendido + Habilitar ADC + Habilitar Interrupciones del ADC +
// Reduce la frecuencia de muestreo para reducir consumo de amperaje.

for( d = 240; d > 0; d-- ); //Retraso para permitir que la referencia se estabilice.

P1DIR=0x01; //Para habilitar P1

while(1)
{
  ADC10CTL0 |= ENC + ADC10SC;      // Activacion de el ADC + SC (Start Conversion)

  __bis_SR_register(CPUOFF + GIE);
// LPM0 (Low Power Mode 0) Modo de ahorro de energía +
//GIE (General Interrupt Enable) Habilitación de interrupciones

  if(ADC10MEM >= 0x1FF) // Si ADCMEM es igual al valor establecido la salida es un P1OUT = 0x0;
    // cero lógico
  else // Si no entonces la salida será 1 logico
    P1OUT =0x1;
}
return 0;
}

#pragma vector=ADC10_VECTOR //Interrupción del ADC (Activada cuando se completa
//la conversión.
__interrupt void ADC10_ISR(void)
{
  __bic_SR_register_on_exit(CPUOFF); // Clear CPUOFF bit from 0(SR) Sale
// de el modo de bajo consume de energía.
}
*****
```

A continuación se explican los registros conforme se van presentando en el programa:

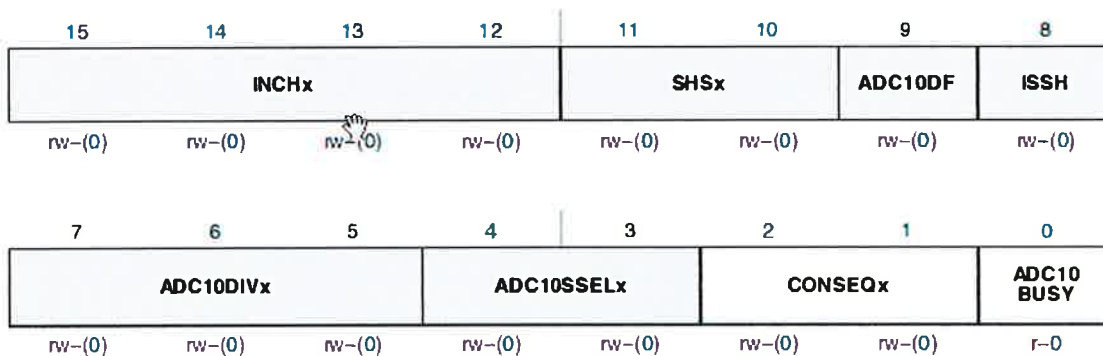
La primera línea que contiene es esta:

```
ADC10CTL1 = INCH_0 + ADC10DIV_0;
// ADC0 + clk dividido entre 0 para este clk (sin prescaler)
```

Lo primero que hay que observar es que a la **izquierda** siempre se encuentran los **registros** y a la **derecha** se encuentran los **bits de configuración**.

Los nombres de estos registros no vienen a ser un misterio, se encuentran directamente en la hoja de datos del microcontrolador:

ADC10CTL1, ADC10 Control Register 1



Modifiable only when ENC = 0

El hecho de que no vayan en orden es por limitaciones de la misma programación en sí. Los bits sobreados solo pueden ser modificados cuando el bit ENC se encuentra en 0.

Mucho menos los bits, que vienen a ser explicados justo después del registro:

| Register | Bits | Input channel |
|-----------------------|-------|-----------------------|
| INCHx | 15-12 | the highest ch |
| | | 0000 A0 |
| | | 0001 A1 |
| | | 0010 A2 |
| | | 0011 A3 |
| | | 0100 A4 |
| | | 0101 A5 |
| | | 0110 A6 |
| | | 0111 A7 |
| | | 1000 V _{REF} |
| | | 1001 V _{REF} |
| | | 1010 Temp |
| | | 1011 (V _{CC} |
| | | 1100 (V _{CC} |
| | | 1101 (V _{CC} |
| | | 1110 (V _{CC} |
| 1111 (V _{CC} | | |
| SHSx | 11-10 | Sample-and-h |
| | | 00 ADC10S |
| | | 01 Timer_A |

Lo que significa, que con la hoja de datos nos podemos dar idea de la operación de los registros, y no solo eso ya podemos controlarlos.

Lo primero que haremos será configurar el registro **ADC10CTL1**. Conforme al orden del programa:

INCH_0: este bit de configuración toma su nombre de **IN CHANNEL**, que como su nombre lo indica nos permite seleccionar cual ADC queremos usar:

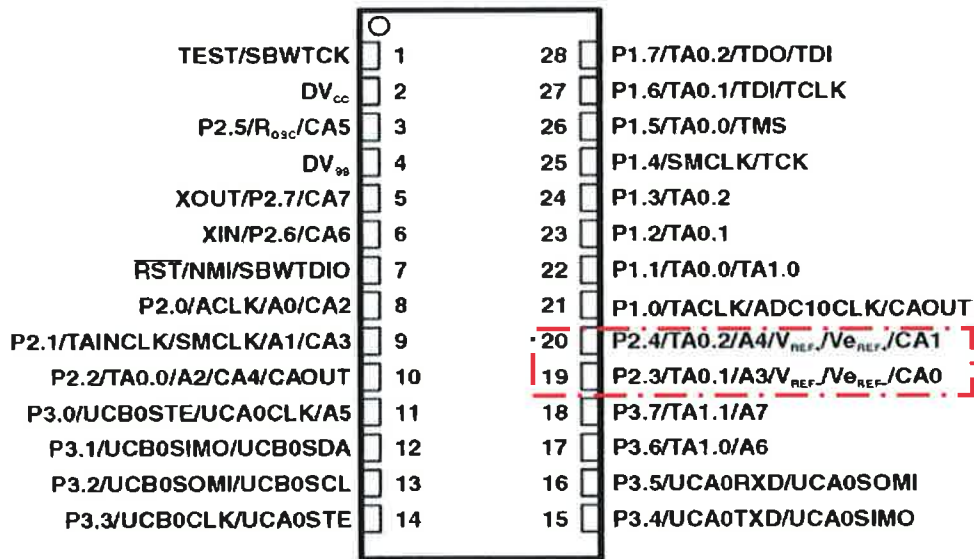
| INCHx | Bits 15-12 | Input channel select. These bits select the channel for a single-conversion or the highest channel for a sequence of conversions. |
|-------|---------------|---|
| | 0000 | A0 |
| | 0001 | A1 |
| | 0010 | A2 |
| | 0011 | A3 |
| | 0100 | A4 |
| | 0101 | A5 |
| | 0110 | A6 |
| | 0111 | A7 |
| | 1000 | V_{REF+} |
| | 1001 | V_{REF-}/V_{REF-} |
| | 1010 | Temperature sensor |
| | 1011 | $(V_{CC} - V_{SS}) / 2$ |
| | 1100 | $(V_{CC} - V_{SS}) / 2$, A12 on MSP430x22xx devices |
| | 1101 | $(V_{CC} - V_{SS}) / 2$, A13 on MSP430x22xx devices |
| | 1110 | $(V_{CC} - V_{SS}) / 2$, A14 on MSP430x22xx devices |
| | 1111 | $(V_{CC} - V_{SS}) / 2$, A15 on MSP430x22xx devices |

A0 viene a ser **INCH_0**, **A1 INCH_1**... etc. este también opera como un ADC con la diferencia que este no necesita conexión externa.

El bit de configuración **ADC10DIV_0** se comporta como un *preescaler*, básicamente un *prescaler* es un divisor de frecuencia, en este caso:

| ADC10DIVx | Bits 7-5 | ADC10 clock divider |
|-----------|-------------|---------------------|
| | 000 | /1 |
| | 001 | /2 |
| | 010 | /3 |
| | 011 | /4 |
| | 100 | /5 |
| | 101 | /6 |
| | 110 | /7 |
| | 111 | /8 |

ADC10DIV_0 viene a ser una división entre 1, es decir, el reloj que se escoja posteriormente para su funcionamiento no será dividido entre nada y funcionara a la velocidad del mismo, **ADC10DIV_1** configura una división entre 2, si nosotros tenemos un reloj de 8 MHz, la frecuencia a la cual funcionará el ADC será a 4 MHz... y así sucesivamente. Sin complicarnos mucho, **ADC10DIV_0** es una opción viable para la mayoría de las aplicaciones. La siguiente línea de código es un poco más extensa en cuanto a configuración del registro:



En la imagen de arriba se pueden apreciar los pines específicos para las referencias externas, pero estas pueden ser usadas o no dependiendo del bit de configuración, Nosotros usamos **SREF_2** que viene a ser referencia negativa interna (proporcionada por el microcontrolador), y referencia positiva externa proporcionada por nosotros.

| SREFx | Bits | Select reference |
|-------|-------|---|
| | 15-13 | 000 $V_{R+} = V_{CC}$ and $V_{R-} = V_{SS}$ |
| | | 001 $V_{R+} = V_{REF+}$ and $V_{R-} = V_{SS}$ |
| | | 010 $V_{R+} = V_{eREF+}$ and $V_{R-} = V_{SS}$ |
| | | 011 $V_{R+} = \text{Buffered } V_{eREF+}$ and $V_{R-} = V_{SS}$ |
| | | 100 $V_{R+} = V_{CC}$ and $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$ |
| | | 101 $V_{R+} = V_{REF+}$ and $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$ |
| | | 110 $V_{R+} = V_{eREF+}$ and $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$ |
| | | 111 $V_{R+} = \text{Buffered } V_{eREF+}$ and $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$ |

Todo esto se encuentra en la hoja de datos **User's Guide** que mencione anteriormente.

000 vendría a ser **SREF_0**, referencia positiva = $V_{R+} = V_{CC}$ (3v Interna) y referencia negativa = $V_{R-} = V_{SS}$ (0v Interna) es decir, la misma alimentación del microcontrolador.

001 es **SREF_1** y aquí $V_{R+} = V_{ref+}$ (1.5v interna) y $V_{R-} = V_{SS}$ (0v interna)

002 = **SREF_2**. Esta configuración es una de las más usadas, si no se desea tener un límite de hasta 3 volts, si no algo un poco mayor como por ejemplo 5 volts se requiere forzosamente de una referencia positiva externa.

Resumiendo, esta configuración VR+ = Vref+ = Referencia externa en el pin P2.4 (5 volts constantes para el caso que mencioné anteriormente) y VR- = Vss (0v referencia interna) De acuerdo a las necesidades se puede seleccionar a gusto el **SREF** que mejor se acomode a la situación.

ADC10SHT_3: probablemente muchos no estén familiarizados con un término llamado **sample and hold**, para este micro son ciclos de reloj que usa para retener una muestra (y ser capaz de medirla), usado sobre todo cuando los valores están cambiando mucho. Para no hacer más larga la explicación del ADC, **ADC10SHT_3** retiene 64 ciclos de reloj la muestra, si se requieren menos puede ir bajando el ultimo numero. Consultar principalmente en la hoja de datos.

REFON inicializa el generador de referencia interno del micro, sirve para poder usar las referencias internas.

ADC10ON enciende el modulo ADC del microcontrolador, al ser los MSP430 muy estrictos con el manejo de energía, muchos de los módulos vienen apagados por default.

ADC10IE habilita las interrupciones del modulo ADC, son muy usadas por ejemplo para apagar el procesador mientras se está realizando la conversión analógico digital.

ADC10SR Reduce el consumo de energía aun más al reducir de 200 kilo muestras por segundo (en inglés kilo samples per second o ksps) a 50, si se desea un funcionamiento más rápido basta con no colocar este bit de configuración.

Después de un retardo pasamos a la siguiente línea de instrucción (Ya adentro de un ciclo infinito while):

```
while(1)
{
  ADC10CTL0 |= ENC + ADC10SC;      // Activacion de el ADC + SC (Start Conversion)
```

Aquí, puesto que ya habíamos configurado con anterioridad el registro **ADC10CTL0** lo que se hace para comenzar la conversión es **sumar** dos bits más de configuración:

ENC habilita la conversión y **ADC10SC** comienza la conversión, es aquí cuando nuestro ADC comienza a convertir de un voltaje analógico a uno digital. En este punto nuestro ADC se encuentra ya funcionando.

Después nos adentramos en esta instrucción:

```
  __bis_SR_register(CPUOFF + GIE);
  // LPM0 (Low Power Mode 0) Modo de ahorro de energía +
```

CPUOFF se refiere tal cual a apagar el CPU del microcontrolador, esto para entrar en modo de bajo consumo de energía y además **GIE** se encarga de habilitar las interrupciones, en este caso, la responsable de que el CPU vuelva a despertar y continúe haciendo operaciones:

```
#pragma vector=ADC10_VECTOR //Interrupción del ADC (Activada cuando se completa
                             //la conversión.
```

```
__interrupt void ADC10_ISR(void)
{
    __bic_SR_register_on_exit(CPUOFF);    // Clear CPUOFF bit from 0(SR) Sale
                                           // de el modo de bajo consume de energía.
```

La parte roja de la parte de arriba declara la interrupción del ADC cuando este termina la conversión.

Una interrupción es una petición que se le hace a algún procesador, y al ser interrupción el procesador **interrumpe** lo que está haciendo para atender esta petición. Como habilitamos el modo de bajo consumo de energía pero dejamos habilitadas las interrupciones el procesador hará caso a la misma.

Se puede apreciar que hay un **void ADC10_ISR(void)**, esta es una función tal cual que se coloca para especificar qué proceso ha de realizar el microcontrolador una vez recibida la interrupción.

Nuestra única línea de código que hay en esta función es la de despertar al procesador de su estado apagado para que nos permita continuar exactamente en donde nos quedamos del programa.

Una vez que la interrupción es completada el programa continua normalmente donde se quedó:

```
if(ADC10MEM >= 0x1FF)    // Si ADCMEM es igual o mayor al valor establecido la salida
es P1OUT = 0x0;          // un cero lógico
else                     //Si no entonces la salida será 1 logico
    P1OUT =0x1;
```

La función if, else es una función de condicionamiento; es decir va a comparar el valor establecido con el valor de ADC10MEM si este es igual o mayor la salida será un cero lógico, ósea cero volts.

Y si en caso contrario es menor a ADC10MEM entonces mandara un 1 lógico ósea 3.3 volts a la salida del puerto (P1.0).

Para activar la alarma se utilizo un zumbador piezoeléctrico, el cual es activado mediante un transistor (2n2222) como se presenta a continuación.

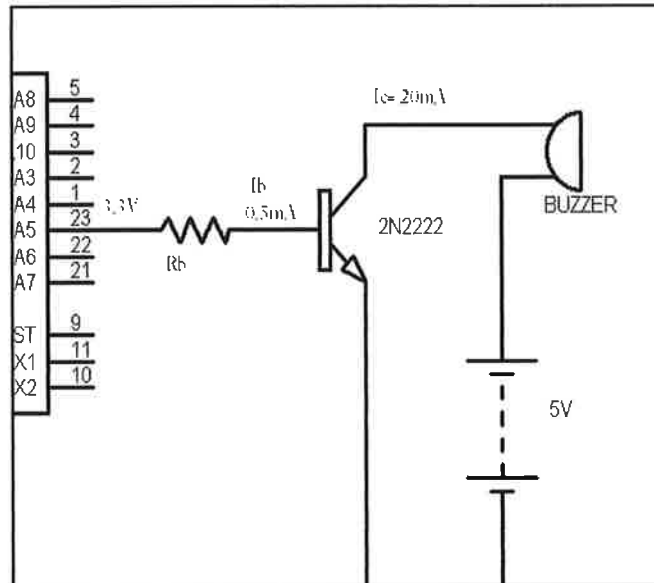


Fig. 37.- Conexión para activar la alarma

Los cálculos del análisis se presentan a continuación.

El PIN del microcontrolador suministra una tensión de 3.3V y nos puede dar una intensidad de 2 mA (como máximo); se quiere conectar una carga que necesita 5V y que consume 20 mA así que se necesita un transistor que pueda proporcionar aproximadamente 100 mA por lo menos. Se checan las hojas de datos y se comprueba que el 2n2222 puede servir. Tiene una I_c de 600 mA y un V_{CE0} de 30 V. Entonces se mide su ganancia B que es 184.

Al necesitar una I_c de 20 mA y tener una ganancia hFE de 184 bastaría un suministro de corriente a la base de $I_b = 20/184 = 0.72$ mA pero para asegurar que el transistor va a conmutar se hace que este suministro alcance $I_b = 0.5$ mA Así que finalmente se tiene que $R_b = 3.3V/0.5mA = 6600 \Omega$ entonces se conecta una resistencia comercial de 6.5K Ω .

PRUEBAS Y RESULTADOS

Armado el circuito y el equipo listo, se realizaron las pruebas finales en las que se debía de detectar diferentes discontinuidades en algunas probetas del laboratorio. Se inspeccionó una placa de hierro y se pudo identificar las discontinuidades, se detectaron tanto discontinuidades superficiales como subsuperficiales.

A continuación se presentan estas pruebas:

Primero se procedió a la limpieza de las piezas a inspeccionar, para evitar algún residuo o material no deseado sobre la placa lo cual podría causar algún tipo de confusión.



Fig. 38.- Limpieza de placas

Después se encendió el prototipo aplicando una corriente de 2 Amperes al electroimán y se colocó sobre la placa, produciéndose así el flujo magnético.



Fig. 39.- Inspección de la placa de referencia.

Después se desliza el equipo sobre la placa hasta llegar a las discontinuidades, es en este momento el sensor detecta una variación del flujo magnético, esta señal es enviada al microcontrolador el cual la procesa y activa la alarma.

Debido a la fuga de campo magnético y al detectar una variación en la señal del sensor el microcontrolador da la orden para enviar un pulso que activara el zumbador piezoeléctrico, para avisarnos de una posible discontinuidad en el material.

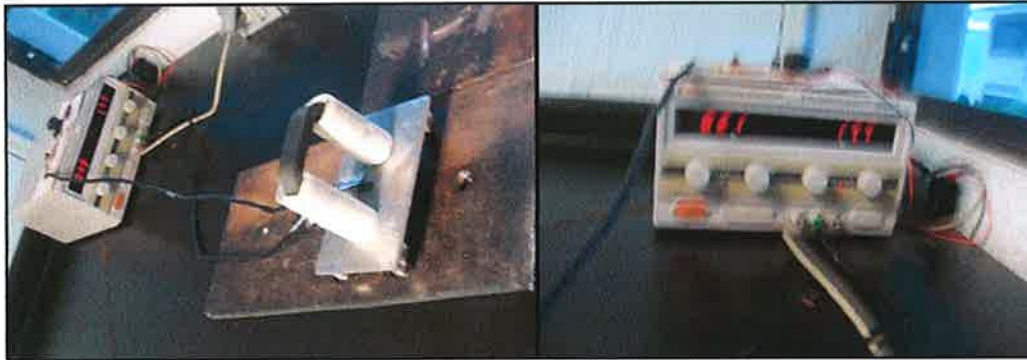


Fig. 40.- Al momento de pasar sobre una discontinuidad se activa la alarma sonora

Una vez que es activada la alarma se verificó visualmente si precisamente hay una discontinuidad en el material y comprobar así la funcionalidad del equipo, una vez comprobado se procede a inspeccionar toda la placa, comprobando que la alarma se activa exactamente al encontrar una discontinuidad en la placa.

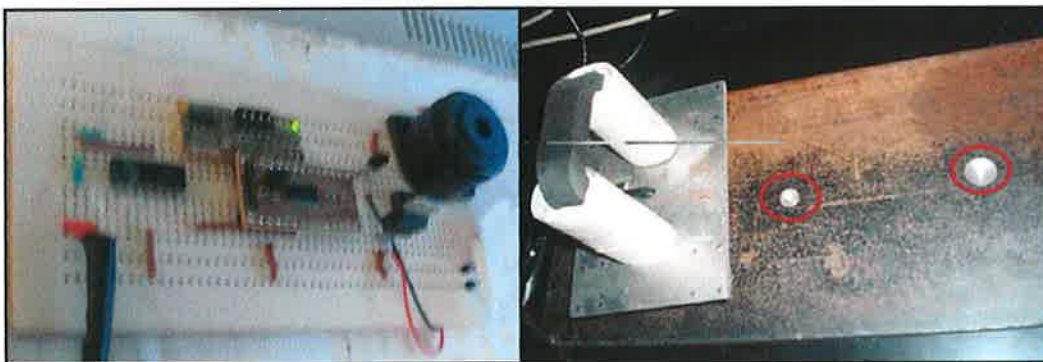


Fig. 41.- al activarse la alarma visualmente se verifica el material para comprobar que Efectivamente se encuentra una discontinuidad

Esta inspección se realiza con otras probetas con diferentes discontinuidades y el resultado fue satisfactorio ya que el prototipo detectó las discontinuidades, al momento de pasar sobre estas.



Fig. 42.- Inspección en diferentes probetas, para detectar fuga de campo magnético

Otro punto importante es la detección de discontinuidades sub-superficiales es decir dentro del material. La sensibilidad del sensor es un poco menor dependiendo de qué tan profundas están las discontinuidades y del material inspeccionado, sin embargo también fueron detectadas dichas discontinuidades sub superficiales.

Comprobando así la efectividad de este prototipo, para en un futuro poder ser llevado a la práctica en el campo de trabajo.

CONCLUSIONES

La técnica de inspección por fuga de campo magnético se ha utilizado desde hace ya bastante tiempo, para detectar diferentes discontinuidades principalmente en los grandes suelos de los tanques de almacenamiento, utilizando al magnetismo como herramienta principal.

Al construir un prototipo que trabaje con esta tecnología, nos dimos cuenta de las muchas aplicaciones que tiene el campo magnético, así como los diferentes medios para su generación, descubrimos también como trabaja un sensor de efecto hall, un sensor que tiene además importantes aplicaciones en la industria.

La parte electrónica también fue muy importante en la elaboración del prototipo, desde el sensor hall hasta el procesamiento de la señal por medio del microcontrolador MSP430F2122 de Texas instruments.

El desarrollo de este prototipo nos demuestra una de las tantas aplicaciones del campo magnético, en este caso para detectar discontinuidades o corrosión en placas de material ferromagnético, dando nos así la pauta para desarrollar un equipo que además de detectarlas nos permita proporcionarnos más datos de dichas discontinuidades, como graficas de localización e incluso tamaño de las discontinuidades.

Cabe mencionar que para el caso de discontinuidades sub-superficiales se dependerá del espesor del material y se recomienda realizar también inspección por ultrasonido en aéreas donde se localicen posibles discontinuidades.

Finalmente el aprendizaje obtenido al realizar este equipo es muy satisfactorio ya que se requirió de una fuerte investigación para su desarrollo. Además de que al realizarlo y obtener buenos resultados, es una gran motivación ya que se contribuye al desarrollo de tecnología echa en México y sobretodo en este centro de investigación.

BIBLIOGRAFIA

Robert L. Boylestad - Introducción al Análisis De Circuitos

María del Carmen Pérez de Landazábal, Paloma Varela Nieto - Orígenes del electromagnetismo. Oersted y Ampère

Porter, P.C.-Use of Magnetic Flux Leakage for the Inspection of Pipelines and Storage Tanks, Nondestructive Evaluation of Aging Utilities, Oakland, California (United States), Reuter, W.O., Ed., SPIE, vol. 2454, pp. 172–184.

J.A. de Raad, Novel Techniques for outside inspection of plant pipework, Insight Vol 37 No 6 June 1995

Portales de internet

<http://www.mfescan.com/index.html>

<http://www.silverwinguk.com/>

<http://www.wikipedia.org/>

<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/technical/chapter2.pdf>

<http://www.battelle.org/pipetechnology/mfl/mfl98main.html>