



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
Proyecto Integrador Profesional
Ingeniería Electrónica

Medición de potencial sincronizado para protección catódica

Gonzalo José Manuel GIMENEZ CASTILLA
Nicolás CASEB

Directores

Ing. Juan Jorge QUIROGA
Ing. Juan José BRION

NEUQUÉN
2017

Resumen

A partir de la solicitud de la empresa Petromark a nuestra Facultad para la realización de una pasantía con el objetivo de participar en la fabricación de un elemento de medición de potencial sincronizado (MPS), es que surge nuestra motivación para implementar a través de este dispositivo todos los conocimientos adquiridos en nuestra formación de carrera universitaria. Con el objetivo de desarrollar un equipo de MPS con tecnología de fácil acceso en un contexto de importaciones cerradas o problemas de importación. Este instrumento es utilizado para controlar el grave problema de corrosión que se presenta en las cañerías subterráneas. Siendo necesario realizar mediciones periódicas de los niveles de potencial a lo largo de estas, para controlar que los niveles de protección catódica sean los indicados, con lo cual la cañería esté correctamente protegida. El MPS es un registrador de datos (*datalogger*), el cual almacena en su memoria interna valores de medición para su posterior análisis, utilizando el método de CIPS (*Close Interval Potential Survey*).

Los procedimientos realizados a partir de la lectura investigativa de diversas fuentes, continuaron con el diseño bosquejado en soporte papel, para luego digitalizarlo utilizando programas de diseño. Desarrollando tanto el *software* como el *hardware*, en etapas consecutivas, necesarios para solucionar la problemática planteada.

A partir de los recursos tecnológicos disponibles en el mercado, se implementaron todos los elementos necesarios, proyectándolos en la concreción de un primer prototipo que fue el origen del segundo y final instrumento de medición, considerando también la estética y la ergonomía.

Palabras claves: Corrosión, Protección Catódica, CIPS, Medición de Potencial Sincronizado, MPS, registrador de datos.

Abstract

From the request of Petromark company to our Faculty for the realization of an internship with the objective of participating in the manufacturing of a synchronized potential measurement element (MPS), is that our motivation to implement through this device arises all the knowledge acquired in our university career training. With the objective of developing an MPS equipment with easily accessible technology in a context of closed imports or import problems. This instrument is used to control the serious problem of corrosion that occurs in underground plumbing. Making periodic measurements of the potential levels along these is necessary to control that the levels of cathodic protection are the indicated ones, with which the pipe is correctly protected. The MPS is a datalogger which stores measurement values in its internal memory for further analysis, using the CIPS method.

The procedures carried out from the investigative reading of diverse sources, went on to the design sketched on paper, to later be digitized using design software. Developing both software and hardware, in consecutive stages, necessary to solve the problem.

From the technological resources available in the market, all the necessary elements were implemented, projecting them in the realization of a first prototype that was the origin of the second and final measuring instrument, also taking aesthetics and ergonomics into account.

Key words: Corrosion, cathodic protection, CIPS, synchronized potential measurement, MPS, Datalogger.

Dedicado a nuestras familias...

Agradecimientos

A nuestros tutores José Brion y Jorge Quiroga, por su gran ayuda y colaboración en cada momento de consulta y soporte en este trabajo de investigación;

A la empresa Petromark por brindarnos un espacio de trabajo y los materiales e instrumental necesarios para el desarrollo del equipo;

A todos y cada uno de los profesores y ayudantes de cátedra que tuvimos a lo largo de la carrera, de quienes aprendimos todo lo que hoy sabemos y aplicamos en este trabajo de investigación;

A nuestros colegas y amigos Fernando Gentili, Damian Di Fiore y Facundo Quiñones, compañeros de carrera, por los aportes fundamentales para la realización de este trabajo;

A Alejandro Casanova alias “Suki”, porque nos prestó una librería de desarrollo, la cual utilizamos, modificándola a nuestras necesidades, para poder controlar el display LCD;

A Cristina Leva, por su generosidad, predisposición y tiempo dedicado a estas líneas;

Muy especialmente a nuestras familias por el apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera;

Y por último a todas y cada una de las personas que se cruzaron en nuestro camino en esta etapa, quienes de alguna manera colaboraron para que hoy estemos en esta instancia y de los cuales hemos aprendido, MUCHAS GRACIAS.

Índice general

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Introducción al trabajo	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodología	2
1.4. Estructura del trabajo	3
Capítulo 2: Marco Teórico.....	4
2.1. Corrosión Galvánica	4
2.2. Protección catódica	6
2.3. Método de Protección Catódica por Corriente Impresa (ICCP)	8
2.4. Método CIS.....	11
Capítulo 3: Desarrollo del equipo	15
3.1. Diseño del Hardware	15
3.2. Diseño del Software.....	36
Capítulo 4: Resultados	45
Capítulo 5: Conclusiones.....	49
Bibliografía	

1.1. Introducción al trabajo

La vida útil de las tuberías y depósitos metálicos se acorta a menudo como resultado de la corrosión. En términos técnicos simplificados, la corrosión ha sido definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica por el medio ambiente y representa la diferencia entre una operación libre de problemas y una con gastos de operación muy elevados. Para efectos prácticos, es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en este campo radica más en su control, que en su eliminación.

La protección catódica se define como “el método de reducir o eliminar la corrosión de un metal, haciendo que la superficie de este, funcione completamente como cátodo cuando se encuentra sumergido o enterrado en un electrólito” [1], considerando que la corrosión puede suceder también en cañerías expuestas a atmosferas corrosivas superficialmente. Pero será objeto de nuestro estudio, las tuberías bajo tierra. Esto se logra haciendo que el potencial eléctrico del metal a proteger se vuelva más electronegativo mediante la aplicación de una corriente directa o la unión de un material de sacrificio (comúnmente magnesio, aluminio o zinc). Entonces, la protección catódica (PC) tiene como fundamento situar el potencial electroquímico de una estructura por debajo de su potencial normal de reducción, en condiciones en las que la velocidad de corrosión es aceptablemente baja [2-3].

La aportación de una determinada cantidad de corriente de protección (icp), se obtiene por medio de **ánodos de sacrificio** en beneficio del metal que se desea proteger, o bien mediante **corriente impresa**, en la que la icp proviene de una fuente externa de corriente continua. Este último método es el que se utiliza en el tema que desarrollaremos en esta tesis.

Para determinar si una cañería se encuentra correctamente protegida por corriente impresa, se utiliza un instrumento llamado Medidor de Potencial Sincronizado (MPS) que utiliza la técnica de CIPS (Close Interval Potential Survey), el mismo es un sistema de inspección desarrollado para el análisis detallado de los niveles de protección catódica en cañerías subterráneas. La técnica consiste en la medición continua de los potenciales de la cañería con respecto al electrodo de referencia de cobre / sulfato de cobre. El operador realiza un recorrido del ducto extendiendo un alambre de fino calibre desde el poste de prueba más cercano. El alambre se conecta a un par de celdas de referencia a través de una computadora de campo MPS. Considerando que las celdas de referencia son los sensores que se irán apoyando en la superficie en forma alternada, el operador avanza sobre la cañería y la computadora de campo registra los valores de los potenciales, como también las coordenadas geográficas de cada punto de medición, recibidas de un módulo de GPS. Los valores antes mencionados son almacenados en una memoria SD para posteriormente ser analizados y lograr obtener un mapeo de la cañería con respecto a su estado de protección catódica punto a punto.

En el año 2008 se comienzan a restringir las importaciones como medida política que afecta ampliamente la industria petrolera. No permitiendo la entrada al país de elementos necesarios para su desarrollo, como instrumental tecnológico. En este marco, en el año 2012 se plantea la posibilidad de desarrollar un equipo de **medición de potencial sincronizado** con materiales de fácil acceso en ese contexto, con el objetivo de cubrir la necesidad de incorporar a la empresa Petromark a sus herramientas tecnológicas un instrumental que en ese momento no era accesible por la restricción antes mencionada de las importaciones.

Luego de realizar una extensa y minuciosa búsqueda de información sobre este tema, consultando bibliografía nacional e internacional de diversas fuentes, se procedió al desarrollo del equipo propuesto en el presente trabajo, logrando resultados y mediciones satisfactorias a la finalización del mismo.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es:

Desarrollar un equipo de medición de potencial sincronizado con tecnología de fácil acceso en un contexto de importaciones cerradas o problemas de importación.

Objetivos específicos:

- Desarrollar un equipo de medición de potencial sincronizado de bajo costo.
- Realizar mediciones de protección catódica en tuberías de petróleo en campos determinados.
- Obtener resultados comparables a la medición de un equipo importado de alta tecnología.

1.3. Metodología

En base a los equipos existentes en el mercado, y con referencias de la tecnología existente, se busca crear un instrumento de iguales o mejores características, destacando los siguientes ítems:

- Diseño: Luego de haber realizado una exhaustiva investigación se consideraron detalles en el diseño del instrumento de medición de potencial sincronizado que se desarrolla en este trabajo. Teniendo en cuenta que se sensaron datos en el orden de los mili volts, se eligió un microcontrolador que cuenta con alta conversión analógica/digital, con respecto a la velocidad y a la cantidad de bits.

-

- Elección del microcontrolador: en base a lo dicho anteriormente, se eligió un microcontrolador de 10 bits, por el hecho del extenso uso que tenemos con la marca microchip se eligió uno de dicha familia.
- Información: Los datos obtenidos por medio del módulo GPS nos darán la información necesaria a utilizar en el proyecto, refiriéndose a la hora que se toma la medición, como también la ubicación geográfica donde se toma la misma.
- Memoria SD: Se configura el microcontrolador para poder almacenar datos en una memoria SD, esto permitió poder observar los datos obtenidos en una PC para su posterior análisis.
- Pruebas y calibración: el instrumento de medición cambia su precisión a través del tiempo, por lo cual se contrasta el equipo con algún elemento patrón y se recalibra, como así también se pueden modificar todas las variables del dispositivo en cualquier momento, a través de una interfaz gráfica que posee el mismo.

1.4. Estructura del trabajo

Este trabajo integrador profesional está organizado de la siguiente manera:

- *Capítulo 1 – Introducción y objetivos del trabajo*: se plantea cómo surge la hipótesis del desarrollo del equipo de Medición de Potencial Sincronizado aplicado a protección catódica, se especifica el objetivo, la metodología y el tiempo estimativo de su realización.
- *Capítulo 2 – Marco teórico*: se realiza una descripción de los aspectos generales de la corrosión galvánica, protección catódica y método CIPS.
- *Capítulo 3 – Desarrollo del Equipo*: en este capítulo se especifica los pasos seguidos para el desarrollo del Hardware y del Software.
- *Capítulo 4 – Resultados*: en este capítulo se muestran las mediciones obtenidas por el dispositivo.
- *Capítulo 5 – Conclusiones*: en este capítulo se detallan los objetivos alcanzados y las conclusiones obtenidas.

2.1. Corrosión Galvánica

La vida útil de los elementos metálicos, por ejemplo tuberías de la industria petrolera, se acorta a menudo como resultado de la corrosión. La corrosión galvánica es un fenómeno electroquímico que se produce entre dos metales en contacto ante la presencia de un electrolito [2] y representa la diferencia entre una operación libre de problemas y una con gastos de operación muy elevados.

Para efectos prácticos, es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en este campo radica más en su control, que en su eliminación siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño de las instalaciones y no después de ponerlas en operación.

Los diferentes tipos de corrosión se presentan en la Tabla 1 y se esquematizan en la Figura 1.

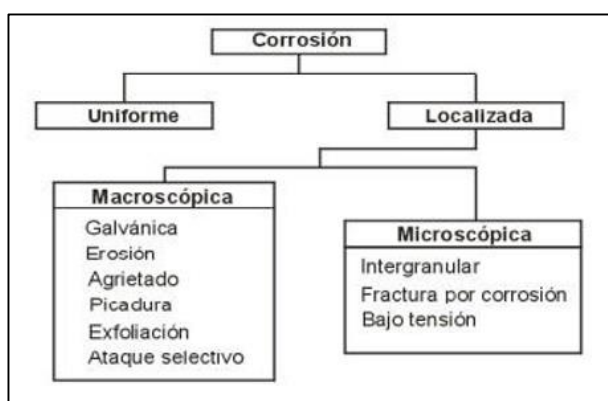


Tabla 1.-Las diferentes formas de corrosión.

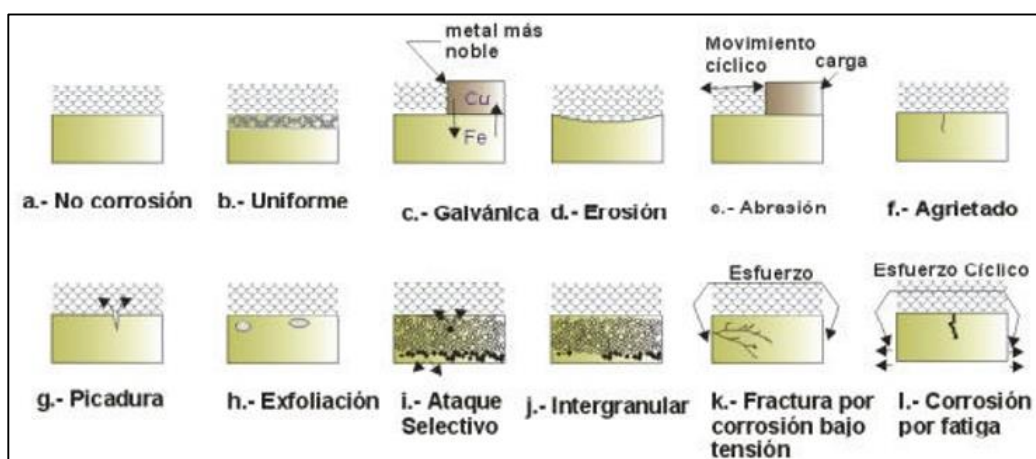


Fig. 1.-Corrosión de metales y aleaciones [5].

Para la realización de esta investigación se estudia puntualmente la Corrosión Galvánica, puesto que la misma es la que afecta a las tuberías metálicas enterradas, que son el objeto de estudio en el presente trabajo.

Una tubería de acero, por ejemplo, vista microscópicamente presenta una configuración similar a la Figura 2.a y 2.b, es decir, conjuntos granulares. Cada uno de estos “granos”, de acuerdo al proceso de fabricación y calidad del material, se comporta como un electrodo con una tendencia anódica o catódica específica y estos producen la corrosión localizada.

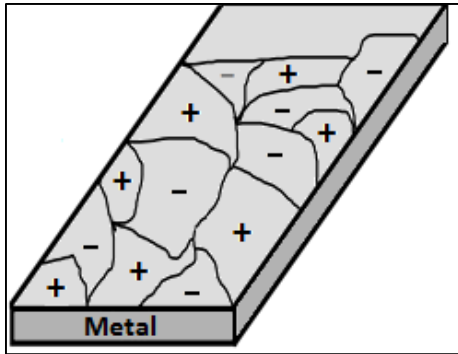


Fig. 2a – Vista ampliada de una superficie metálica [6].

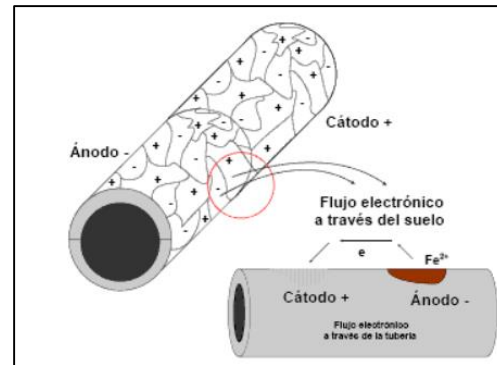


Fig. 2b- Conjuntos granulares con características galvánicas catódicas y anódicas que producen la corrosión localizada [7].

Para que se conforme una pila o se cierre el circuito entre estos polos, es necesario un cable o medio electrolítico que transporte los electrones. Para el caso de la tubería enterrada este medio de transporte de electrones lo conforma el suelo y la tubería misma, esta situación se puede observar en la Figura 3.

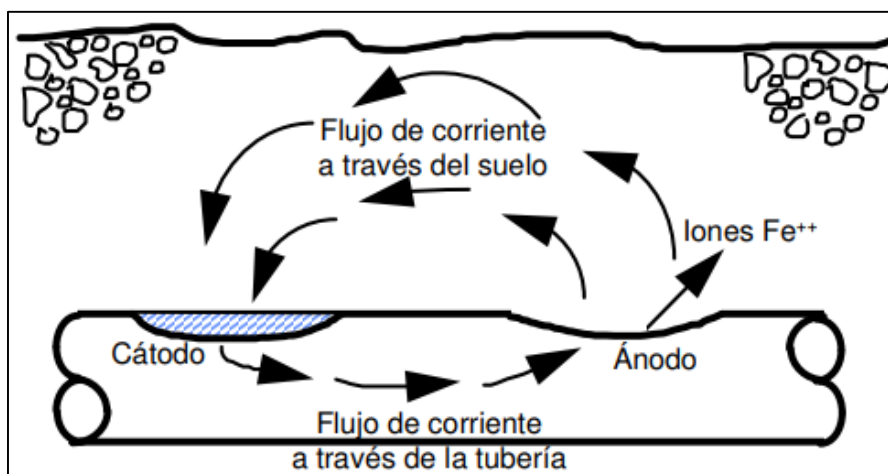


Fig. 3 – Descripción gráfica del proceso de corrosión galvánica [8]

La zona con tendencia anódica cede electrones y la zona de tendencia catódica los recibe. El equivalente eléctrico de este circuito o celda de corrosión lo observamos en la Figura 4.

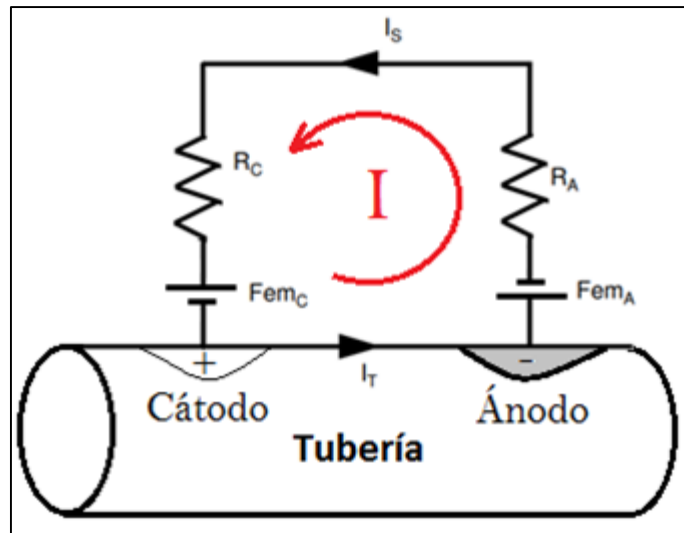


Fig. 4 – Equivalente eléctrico de una celda de corrosión.

En la interfase entre el metal y el suelo existe una fuerza electromotriz (FEM), también llamado potencial de referencia. Cuando la corriente fluye, la fuerza electromotriz cambia de tal manera que las proximidades entre el metal y el suelo pueden ser representadas por una resistencia en serie con una fuente de FEM.

Estos dos circuitos juntos representan una celda de corrosión en la cual F_{emC} es el potencial del cátodo, R_C la resistencia del cátodo, F_{emA} es el potencial del ánodo, R_A es la resistencia del ánodo y finalmente I es la corriente a través del circuito.

2.2. Protección anticorrosiva

Todo material metálico sin la debida protección y en un medio que propicie el intercambio de electrones es susceptible a corroerse. Por lo tanto es necesario proteger la estructura metálica para evitar posibles consecuencias como pérdida del fluido, daños en las instalaciones, contaminación, e incluso puede llegar a suponer un riesgo para las vidas humanas.

Existen cuatro métodos comúnmente utilizados para controlar la corrosión en tuberías, estos son recubrimientos protectores y revestimientos, protección catódica, selección de materiales e inhibidores de corrosión. Que detallaremos a continuación:

- a) **Recubrimientos y revestimientos:** estas son las principales herramientas contra la corrosión, a menudo son aplicados en conjunción con sistemas de protección catódica para optimizar el costo de la protección de tuberías. En la Figura 5 se observa un proceso de aplicación de un revestimiento protector.



Fig. 5 – Aplicación de revestimiento protector de corrosión a una tubería que será luego enterrada [9].

- b) Selección de materiales:** se refiere a la selección y empleo de materiales resistentes a la corrosión, tales como: acero inoxidable, plásticos y aleaciones especiales que alarguen la vida útil de una estructura, por ejemplo de la tubería. Sin embargo, en la selección de materiales resistentes a la corrosión el criterio fundamental no es, en esencia, la protección de una estructura, sino la protección o conservación del medio donde esta existe.
- c) Inhibidores de Corrosión:** son sustancias que aplicadas a un medio particular, reducen el ataque del ambiente sobre el material. bien sea metal o acero de refuerzo en concreto. Los inhibidores de corrosión extienden la vida de las tuberías, previniendo fallas y evitando escapes involuntarios.
- d) Protección Catódica:** es una tecnología que utiliza corriente eléctrica directa para contrarrestar la normal corrosión externa del metal del que está constituido la tubería. La protección catódica es utilizada en los casos donde toda la tubería o parte de ella se encuentra enterrada o sumergida bajo el agua. En tuberías nuevas, la protección catódica ayuda a prevenir la corrosión desde el principio; en tuberías con un período de operación considerable puede ayudar a detener el proceso de corrosión existente y evitar un deterioro mayor.

Actualmente en la industria, se acepta generalmente que la combinación de revestimientos dieléctricos con sistemas de protección catódica es la medida más efectiva para controlar los efectos de corrosión externa en cañerías subterráneas. Siendo este el método en el que se hizo mayor foco debido a que es el que quisimos poder medir con el equipo.

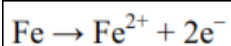
Las tuberías enterradas, a diferencia de las superficiales, se encuentran completamente sumergidas en un medio electrolítico. Cada suelo tiene características particulares de resistividad-conductividad específicas, y a lo largo de la longitud de la línea esta resistividad varía por efectos de cercanías a cuerpos de agua, instalaciones enterradas, bases de edificaciones, torres de alta tensión, otras tuberías, etc. Para garantizar la protección contra la corrosión de una tubería enterrada no es suficiente un recubrimiento de pintura. Es necesario la aplicación de revestimientos que aíslen la tubería del medio en que se encuentra. Estos revestimientos pueden ser: polietileno o polipropileno, resina epóxica, brea epóxica, imprimante y cinta plástica adhesiva, etc. Pero la realidad es que

ningún revestimiento garantiza una protección del 100%. Impurezas en el material o proceso de aplicación de la capa protectora, golpes o ralladuras al momento del transporte o instalación pueden desmejorar el aislamiento. Es por esta razón que para garantizar la prolongación de la vida útil de una tubería revestida se acompaña de un sistema de protección catódica.

Existen dos métodos fundamentales para realizar la PC, mediante ánodos de sacrificio o bien mediante corriente impresa. Como se explicó anteriormente, en las zonas anódicas de la tubería la corriente fluye de la estructura de acero hacia el electrólito que la rodea (suelo o agua) y se corroe la estructura metálica.

En vista de lo anterior, resulta evidente que la velocidad de corrosión se podría reducir si cada trozo de metal expuesto en la superficie de una tubería pudiera recoger corriente desde el electrólito. Esto es exactamente lo que hace la protección catódica (PC), la corriente continua es forzada sobre toda la superficie de la estructura metálica. La corriente continua modifica el potencial de la tubería en la zona activa (negativa), resultando en una reducción de la velocidad de corrosión del metal. Cuando la cantidad de corriente que fluye se ajusta correctamente, domina la descarga de corriente de corrosión de las zonas anódica de la estructura, y se produce un flujo neto en la superficie de la estructura metálica en estos puntos. Toda la superficie será un cátodo y la velocidad de corrosión se reduce.

La protección catódica (PC) tiene como fundamento situar el potencial electroquímico de una estructura por debajo de su potencial normal de reducción, en condiciones en las que la velocidad de corrosión es aceptablemente baja [2–4]. Esto se consigue aportando una determinada cantidad de corriente a la estructura, denominada densidad de corriente de protección (i_{cp}), (a) mediante ánodos de sacrificio (SACP), los metales más activos actúan de ánodos, ‘sacrificándose’ en beneficio del metal que se desea proteger y que actúa de cátodo; o (b) mediante corriente impresa (ICCP), en la que la corriente de protección proviene de una fuente externa de corriente continua, en la que el polo negativo se conecta al metal a proteger y el polo positivo a un ánodo auxiliar inerte (electrodo dispersor de la corriente), cerrándose el circuito a través del electrólito. Este último es que se desarrolla en detalle en el presente trabajo debido a que es el aplicado a los sistemas que se estudian. La reacción anódica de disolución del hierro está dada por:



2.3. Método de Protección Catódica por Corriente Impresa (ICCP)

El sistema de protección catódica por corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos. En este sistema de protección catódica se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura, como se muestra en la figura 6.

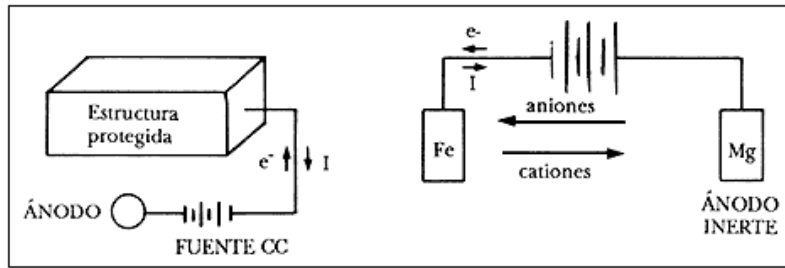
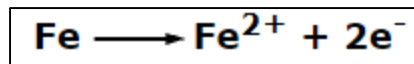


Fig. 6 – Esquema básico de Protección Catódica por Corriente Impresa [10].

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferro-silicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

Este sistema de protección catódica tiene la característica de que utiliza como ánodo dispersor de la corriente (electrodo auxiliar) materiales metálicos que en mayor o menor grado se consumen con el paso de la corriente. Sin embargo, el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas, las cuales dependen tanto del material anódico, como del ambiente que rodea al mismo e incluso de la densidad de corriente que éste suministra.

Por ejemplo, en el caso de un ánodo de chatarra de hierro o de acero al carbono, la reacción electródica es la de disolución del hierro:



Los componentes de un sistema de protección catódica con corriente impresa son:

a) Un ánodo dispersor, b) Una fuente de corriente continua y c) El cable portador de la corriente. En la figura 7 se presenta un esquema de la protección de una tubería enterrada en el suelo.

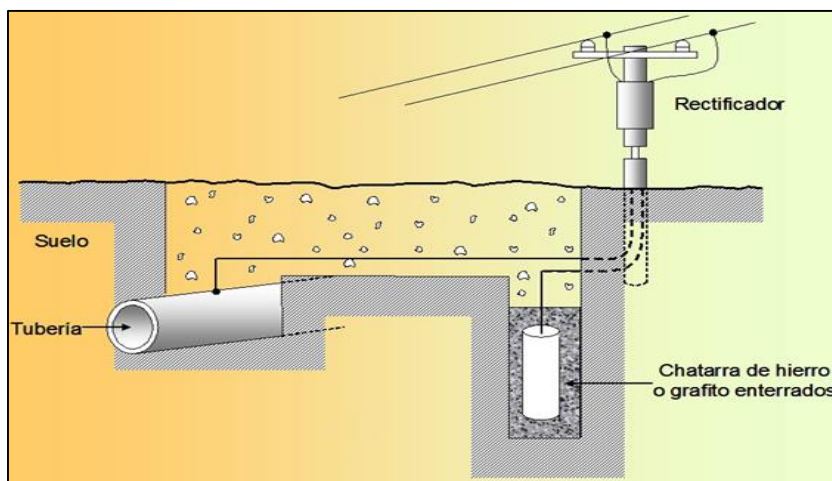


Fig. 7 - Esquema de Protección Catódica por Corriente Impresa [11].

Fuentes de corriente: El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. La forma más común de obtener esta corriente continua, es mediante rectificadores, los cuales transforman una tensión alterna de alimentación en la corriente continua requerida, como se observa en la Fig.7. La tensión de salida puede ajustarse según las necesidades. Un sistema de corriente impresa debe poder funcionar de forma permanente al menos durante diez años.

A continuación se muestra un esquema básico de cómo está conformado dicho rectificador.

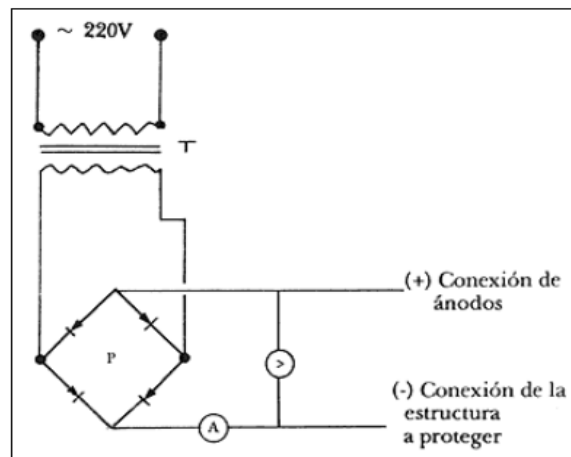


Fig. 8 – Esquema de rectificador eléctrico [12].

Un voltímetro indica la tensión de salida y un amperímetro la intensidad total.

Cuando se necesitan intensidades altas de corriente es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica de 380 V.

Esencialmente, se puede decir que este método es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio cuando se trata de proteger estructuras muy grandes, con una gran demanda de corriente y/o cuando la resistividad del ambiente es elevada.

Ventajas:

- Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente.
- Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente.
- Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes.
- Potencial y corriente variables.
- Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.
- Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.

Limitaciones:

- Puede causar problemas de interferencia.
- Está sujeto a rotura de la fuente de corriente.
- Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.

- Requiere de una fuente de corriente continua.
- Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrogeno.
- Conexiones y cables sujetos a roturas.
- Tiene un costo elevado.

2.4. Método CIPS

La técnica de CIPS (Close Interval Potential Survey), (Inspección de Potencial de Intervalo Cercano) es un sistema de inspección desarrollado para el análisis detallado de los niveles de protección catódica en cañerías subterráneas. La técnica consiste en la medición continua de los potenciales de la cañería con respecto a un electrodo de referencia de cobre / sulfato de cobre, ubicado en el extremo de un “bastón de medición”. El operador realiza un recorrido del ducto extendiendo un alambre de fino calibre desde el poste de prueba más cercano, el cual se encuentra conectado físicamente a la cañería. El alambre se conecta a un par de celdas de referencia a través de una computadora de campo. Las celdas de referencia se apoyan alternadamente sobre la tierra mientras el operador avanza sobre la cañería y la computadora de campo (MPS) registra los valores de los potenciales.

Los potenciales de la cañería son registrados con corriente encendida (potenciales “on”) y con corriente apagada (potenciales “off”) para eliminar los errores de “IR” en las mediciones causados por el flujo de corriente entre la cañería y las celdas de referencia. Para obtener los potenciales “off”, se colocan temporizadores cíclicos en todas las fuentes de protección catódica con influencia en la zona bajo estudio. Los temporizadores deben funcionar en perfecta sincronía para permitir mediciones precisas de potenciales “off”, para esto se utiliza un GPS con lo cual se consigue una perfecta sincronía entre los dispositivos.

Los resultados de los estudios de CIPS sirven para los siguientes propósitos:

(a) Identificación de los niveles de protección de la cañería:

Luego de tomadas las mediciones pertinentes, cuyos resultados están registrados en el Medidor de Potencial Sincronizado, conformando el perfil de potenciales “off” de las gráficas de CIPS, que sirve para identificar con precisión los niveles de polarización de la cañería. Los potenciales “off” (que en la Fig.9 se verán en color rojo) se deben mantener entre la frontera de subprotección (-850 mV) y la frontera de sobreprotección (-1140 mV), estos valores se observan en línea punteada en la Fig.9. Potenciales “off” por debajo de -850 mV sugieren una insuficiente polarización del acero de la cañería, situación que puede permitir la corrosión de la cañería. Potenciales “off” por arriba de -1140 mV sugieren una excesiva polarización del acero de la cañería, situación que puede resultar perjudicial para el revestimiento de la cañería por efectos de despegue catódico.

(b) Estimación del estado del revestimiento de la cañería:

El perfil de potenciales “on” resulta una herramienta útil para la evaluación del estado del revestimiento de la cañería. En zonas con una buena calidad de revestimiento, el perfil de potencial se mantiene principalmente estable y existirá una diferencia constante entre los perfiles de potenciales “on-off”. En zonas donde existen defectos en el revestimiento de la cañería, se registrarán valles en el perfil de potencial, siendo los tamaños de los valles proporcionales a la severidad de los defectos. Adicionalmente, existirá una reducción en la diferencia entre los perfiles de potenciales “on-off”.

(c) Identificación de zonas con posibles interferencias eléctricas:

Una función adicional de la técnica de CIPS es la detección de zonas de la cañería afectadas por posibles interferencias eléctricas, particularmente las interferencias de corriente directa asociadas con cargas y descargas de corriente a través de la tierra desde o hacia sistemas de ductos ajenos. Las zonas de carga de corriente manifiestan aumentos significativos tanto en el perfil de potencial “on” como en el perfil de potencial “off”, sin que existan cambios significativos en la diferencia entre ambos perfiles. Similarmente, las zonas de descarga de corriente manifiestan reducciones inusuales en ambos perfiles de potenciales con una diferencia constante entre ambos perfiles.

En resumen, la técnica de CIPS cumple las siguientes funciones:

- Identificación de zonas con inadecuados niveles de protección catódica.
- Identificación de zonas con excesivos niveles de protección catódica.
- Identificación de zonas con posibles deficiencias en la calidad del revestimiento.
- Identificación de zonas afectadas por posibles interferencias eléctricas.

Procedimiento de trabajo:

El proceso de inspección CIPS se conforma de las siguientes etapas:

1) Estudio preliminar de la cañería a inspeccionar:

Comprende el análisis de la ubicación y diseño de la cañería a inspeccionar; identificación de CMP, equipos rectificadores, ERP, válvulas, derivaciones, cruces de ruta, etc.

2) Señalización de la traza de la cañería:

Se procede a señalizar la traza de la cañería con estacas ubicadas cada 30 m de distancia utilizando un detector de cañerías.

3) Intervención de los equipos rectificadores:

En esta etapa se realiza la instalación de los interruptores sincronizados por satélite (temporizadores) sobre los equipos rectificadores que afecten la zona a inspeccionar. Los ciclos de interrupción de los temporizadores conforman una relación determinada de

encendido/apagado para evitar la despolarización significativa de la cañería durante el transcurso de los estudios.

Para confirmar la sincronización de los temporizadores se utiliza un osciloscopio digital, comparando los gráficos de onda y verificando si algún temporizador está fuera de sincronismo en cada uno de los mojones kilométricos, es decir, cada uno de los puntos de referencia que se ubican cada un kilómetro en la trayectoria de la cañería.

4) Relevamiento de potenciales ON-OFF:

Una vez realizada la intervención de los equipos rectificadores, se procede al registro de potenciales On-Off a lo largo de la cañería utilizando un equipo de almacenamiento de datos (data logger). A continuación se describen los pasos comprendidos durante el relevamiento de potenciales:

- a) Las mediciones son realizadas sobre la traza de la cañería con una separación igual a un metro (1 m) entre dos mediciones consecutivas.
- b) En aquellos casos donde la zona de trabajo posee terrenos secos, se procederá a humectar el punto de contacto entre los electrodos de CU-CUSO₄ y el suelo.
- c) Todas las mediciones relevadas serán referidas a los mojones (CMP) u otros puntos de referencias considerados por la empresa.
- d) En el caso de obtener lecturas de los potenciales Off más positivas que -850 mV, o se identifiquen zonas con caídas significativas en el sentido menos negativo; se tomará una medición de potenciales a la derecha y/o izquierda de la cañería.
- e) Se analizarán todos los cruces con cañerías pertenecientes a terceros, los cuales serán referenciados y de ser posible se tomarán mediciones de sus potenciales.
- f) Antes de conectar el equipo a un nuevo poste de medición (CMP), se registrarán datos de conexión cercana y caída de IR.
- g) Se tomará registro, como referencia, de todas aquellas estructuras que se encuentren ubicadas en las cercanías de la traza de la cañería. Como por ejemplo: una torre eléctrica, un tanque de almacenamiento, etc.
- h) Se recolectará el cable utilizado durante la inspección y las estacas de señalización de la traza de la cañería.

5) Descarga de datos en el software:

Al finalizar la jornada de trabajo de campo, se deberán exportar los datos desde el registrador de datos al software destinado al análisis de la información.

6) Análisis de la información relevada:

Mediante la utilización del software se obtiene un perfil eléctrico de la totalidad de la cañería en cuestión, representado por medio de un gráfico de fácil interpretación de potenciales eléctricos en función de la distancia recorrida.

El gráfico que se muestra a continuación ilustra el comportamiento de los potenciales eléctricos On (en azul) y Off (en rojo) a lo largo del tramo en cuestión. Para una mejor interpretación de la información se establecen tramos de aproximadamente 1 Km de distancia, delimitados por dos postes de medición (CMP) consecutivos.

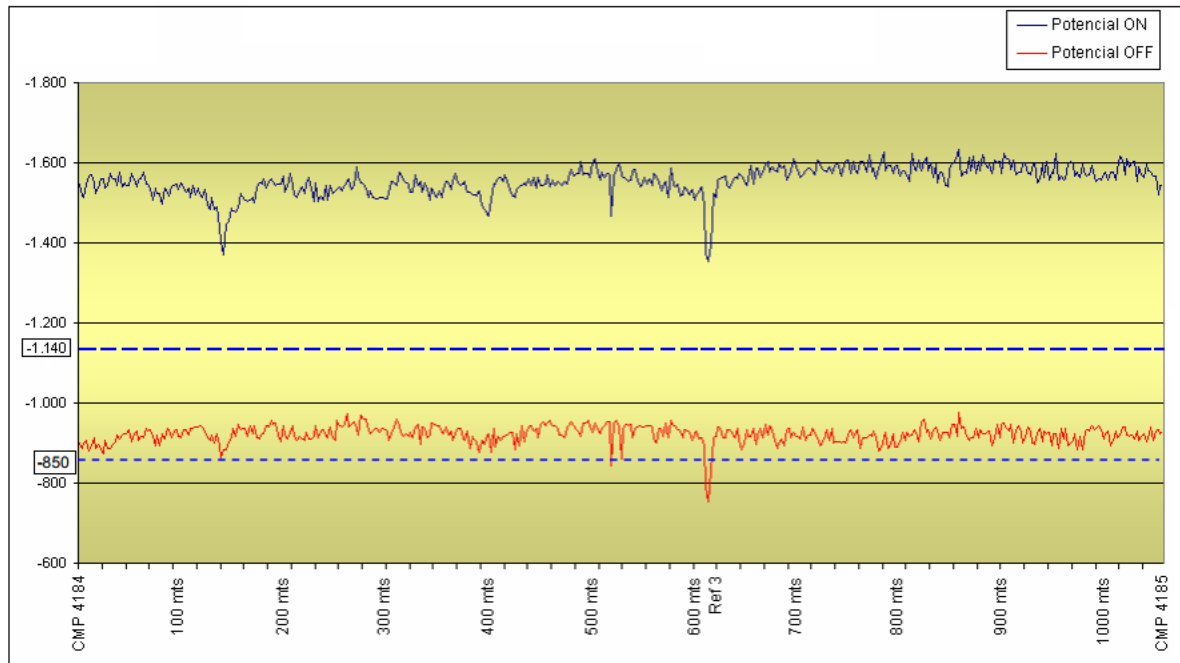


Fig. 9 – Inspección CIPS gráfico potenciales On-Off [13].

En el eje X se expresan las distancias progresivas relativas a cada tramo, indicadas cada 100 metros de distancia con el objetivo de facilitar la identificación de zonas particulares.

Las referencias físicas a lo largo de todo el tramo analizado son representadas mediante un texto alineado en forma vertical dentro del campo del gráfico, posicionado en la progresiva real. De esta manera se pueden considerar otros puntos de referencia sin necesidad de referirse al inicio del estudio, reduciendo el error de las mediciones superficiales al momento de marcar un defecto en el revestimiento.

Por último, el gráfico posee una línea punteada con un valor constante de -850 mV, que se utiliza como una referencia de los niveles de protección y polarización con respecto al límite aceptado por la NAG-100, y una línea punteada con un valor constante de -1140mV marcando el limite aceptable de sobreprotección.

Capítulo 3: Desarrollo del equipo

3.1. Diseño del Hardware

- **EL MICROCONTROLADOR: PIC 18F4620**

Uno de los motivos por el cual se optó por utilizar el PIC 18F4620 fue debido a la cantidad de entradas y salidas del mismo que es de 36 E/S en su versión de 40 pines, en la Fig. 10 se puede observar un detalle del patillaje del microcontrolador utilizado. En un principio se utilizó el 24HJ128 pero no fue funcional ya que al ir agregando periféricos se superó la capacidad de este último.

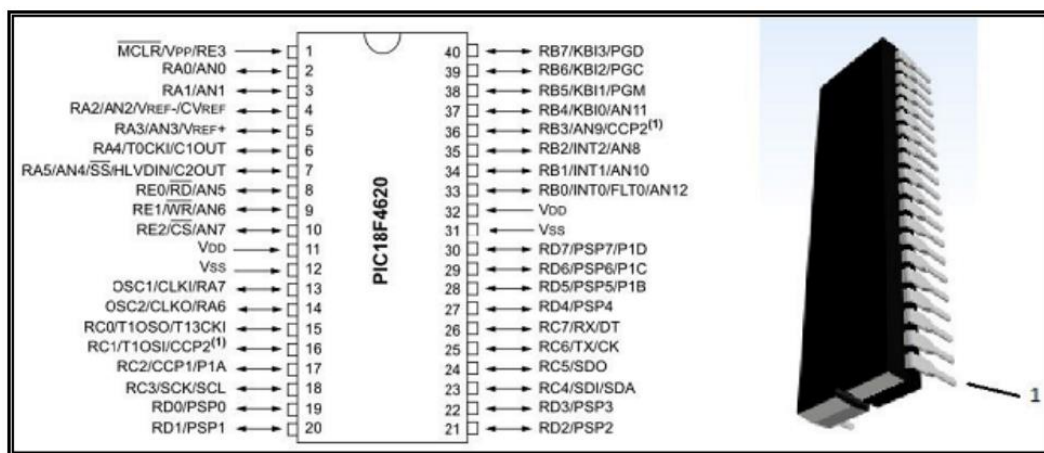


Fig. 10 – Patillaje y encapsulado del 18F4620 (imagen tomada de la hoja de datos del microcontrolador).

Otro motivo importante que condicionó la elección del microcontrolador fue la cantidad de bits del conversor analógico digital (10 bits). Considerando que la resolución mínima necesaria para lograr las mediciones que el equipo obtendría sería de 1mV, es que se analizó qué rangos se debían utilizar como referencia del conversor A/D para obtener los resultados esperados.

En la Figura 11 se observa: **a)** el caso en que el rango es ($V_{min}=0V$; $V_{max}=5V$) en el cual se obtiene una resolución de medición de **$R=4.88mV$** , excediendo el valor pertinente. En la búsqueda de una mejor resolución que fuera condescendiente con los valores necesarios del equipo, en donde los valores abarcativos se encuentran entre (0,5V; 1,5V) es que se concluye con el procedimiento que se muestra en la Fig11.b, en donde el rango de medición es ($V_{min}=0,5V$; $V_{max}=1,5V$), obteniendo una resolución de **$R=0,97mV$** cumpliendo con los requerimientos del equipo.

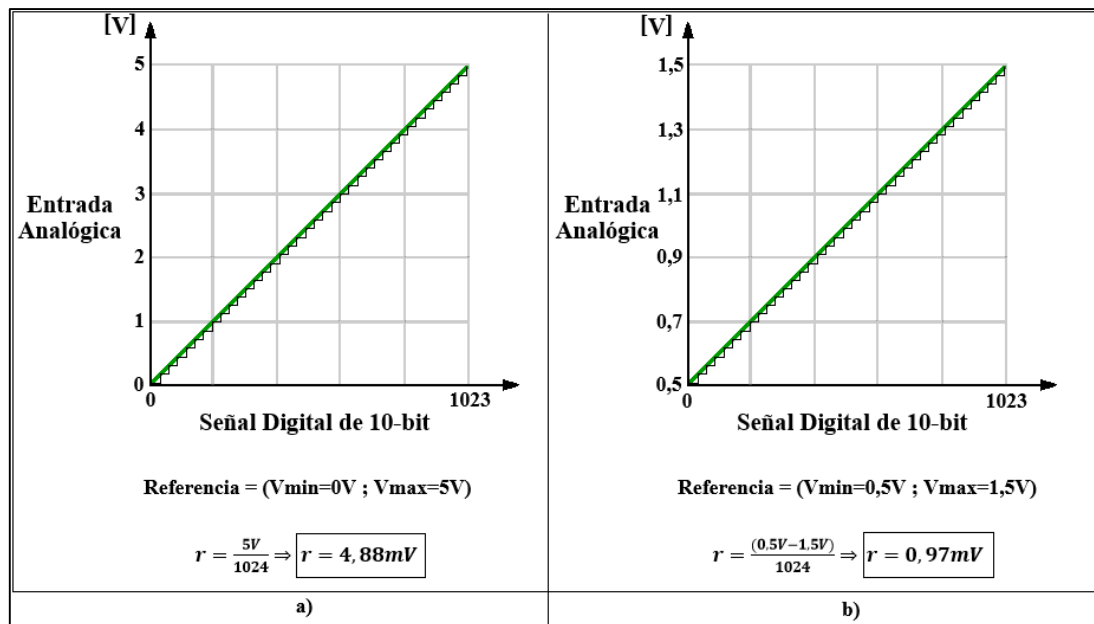


Fig. 11.a – Descripción del cálculo de la resolución para el caso de referencia (0V ; 5V).

Fig. 11.b – Descripción del cálculo de la resolución para el caso de referencia (0,5V ; 1,5V)

El algoritmo final se describe en el diagrama de flujo que se detalla en la Figura 12, en donde se explica el procedimiento de medición y almacenamiento del potencial obtenido durante el recorrido de inspección de la tubería. Se realiza una primer medición con la referencia detallada en **11.a)** (0V; 5V), obteniendo una resolución de $r=4,88\text{mV}$, luego la línea de programa se encuentra con una estructura condicional en la que se consulta si el resultado de la medición se encuentra entre 0,5V y 1,5V, si el valor obtenido se encuentra fuera de este rango, la resolución será $r=4,88\text{mV}$, finalizando este primer procedimiento de medición (siendo estos casos excepcionales). Si el valor medido se encuentra dentro del rango antes mencionado, se cambia la referencia a (0,5V; 1,5V) como se detalla en **11.b)**, con la cual se obtiene una resolución mucho mejor que la anterior ($r=0,97\text{mV}$) y se hace una segunda medición con esta nueva resolución. Este proceso se realiza para lograr obtener una resolución menor a 1mV, que fue uno de los requerimientos planteados al comienzo del proyecto. Se utiliza este rango (0,5V; 1,5V) porque usualmente las medidas que se tomaran están dentro del mismo.

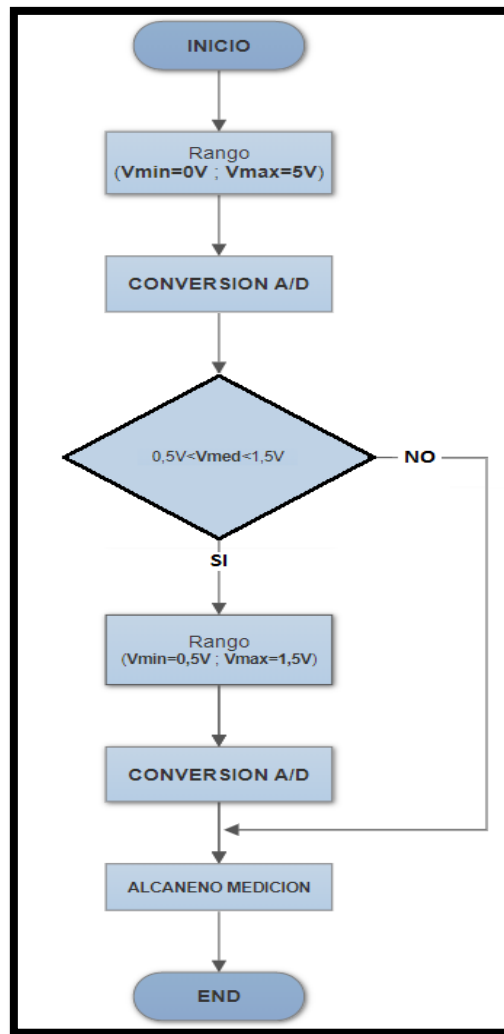


Fig. 12 – Diagrama de flujo del algoritmo de medición de potencial.

- **EL DISPLAY GRÁFICO: WDG0151-TMI-V**

Para visualizar la interfaz gráfica, se optó por utilizar un display GLCD de 128 x 64 puntos de resolución y retroiluminación por LED, modelo WDG0151-TMI-V, fabricado por Winstar Display Co, usando el driver KS108, que es uno de los más utilizados en el mercado, por este motivo se decidió utilizar este display, de fácil acceso, y con las librerías necesarias disponibles para su utilización. El mismo se puede visualizar en la Figura 13.

En principio se buscó utilizar un display de mayores dimensiones para apreciar mejor las mediciones, de 256x128, pero la adquisición del dispositivo era dificultosa ya que no se encontraba disponible en el mercado local, obteniendo posteriormente el de 128 x 64 con accesibilidad inmediata en el mercado.

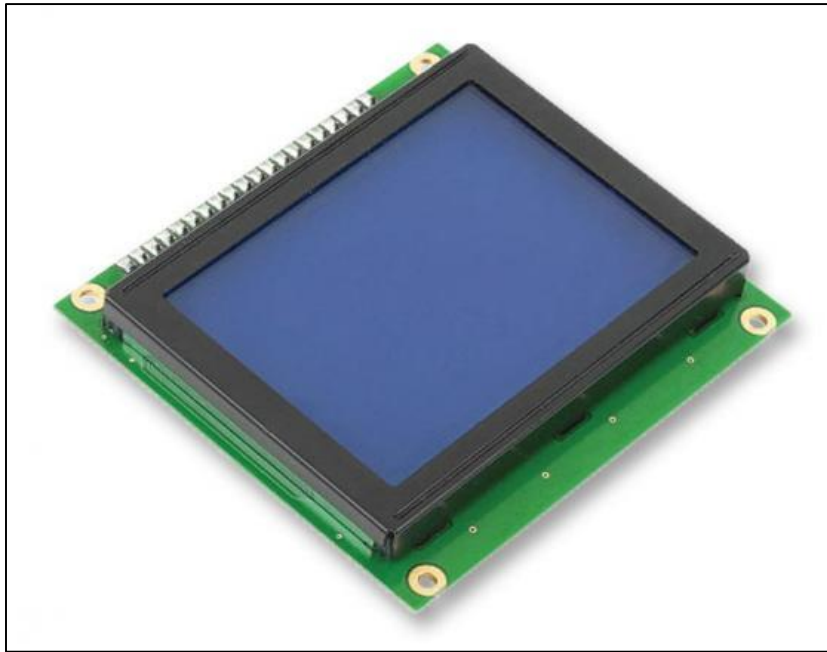


Fig. 13 – Display utilizado en el proyecto (WDG0151-TMI-V) [14].

Esquema de conexión y componentes asociados:

La conexión con el PIC se realiza en paralelo tal y como muestra el esquema de la Figura 14. El esquema también muestra el sistema implementado por la regulación del contraste del GLCD.

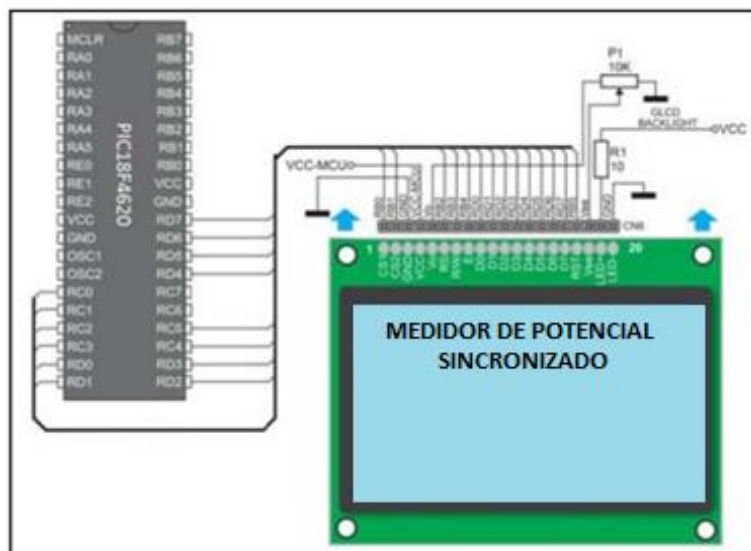


Fig. 14 – Esquema de conexión del display con el μ C.

En la siguiente tabla se observa el detalle de cada pin del display grafico GLCD Winstar, modelo WDG01510.

Pin no.	Symbol	Level	Description
1	$\overline{CS1}$	L	Select segments 1-64
2	$\overline{CS2}$	L	Select segments 65-128
3	V_{SS}	0V	Ground
4	V_{DD}	5.0V	Supply voltage for logic
5	V_o	Variable	Contrast adjustment
6	D/I or RS	H/L	H : Data, L: Instruction
7	R/W	H/L	H: Read data, L: Write data
8	E	H	Enable signal
9-16	D0-D7	H/L	Data bus
17	RST	L	Reset the LCD module
18	V_{EE}		Negative voltage output
19	A		Anode (+) of B/L LED
20	K		Cathode (-) of B/L LED

Tabla 2 – Descripción de pines del display GLCD Winstar (WDG01510)

• **TECLADO MATRICIAL**

El teclado matricial es un dispositivo que agrupa varios pulsadores y permite controlarlos empleando un número de conductores inferior al que necesitaríamos al usarlos de forma individual. Podemos emplear estos teclados como un controlador para un autómatas o un microcontrolador, como el utilizado en este proyecto.

Estos dispositivos agrupan los pulsadores en filas y columnas formando una matriz, disposición que da lugar a su nombre. Es frecuente una disposición rectangular pura de NxM columnas, aunque otras disposiciones son igualmente posibles.

Los teclados matriciales son frecuentes en electrónica e informática. De hecho, los teclados de ordenador normales son teclados matriciales, siendo un buen ejemplo de teclado matricial con disposición no rectangular.

Una de las desventajas de usar un teclado matricial es que pueden causar problemas cuando se pulsa más de una tecla simultáneamente. Este es uno de los motivos por el que los teclados de ordenador usan una disposición no rectangular, agrupando ciertas teclas en circuitos diferentes (Ctrl, Alt, Shift...)

En el campo de la electrónica, se venden múltiples modelos de teclados matriciales en distintos soportes (rígidos o flexibles) y con distinto número de teclas, siendo habituales configuraciones de 3×3, 3×4, y 4×4.

Para el caso puntual de este trabajo, se utilizó un teclado matricial de 4x4, para poder ingresar valores numéricos al programa, luego se realizara una descripción en detalle de esto.

Como hemos dicho, un teclado matricial agrupa los pulsadores en filas y columnas formando una matriz, lo que permite emplear un número menor de conductores para determinar las pulsaciones de las teclas.

La siguiente imagen muestra, a modo de ejemplo, una disposición rectangular de 4x4, aunque el funcionamiento es análogo en otras disposiciones. Al detectar la pulsación en la columna X y la fila Y, sabremos que se ha pulsado la tecla (X,Y).

Internamente la disposición de los pulsadores es la siguiente.

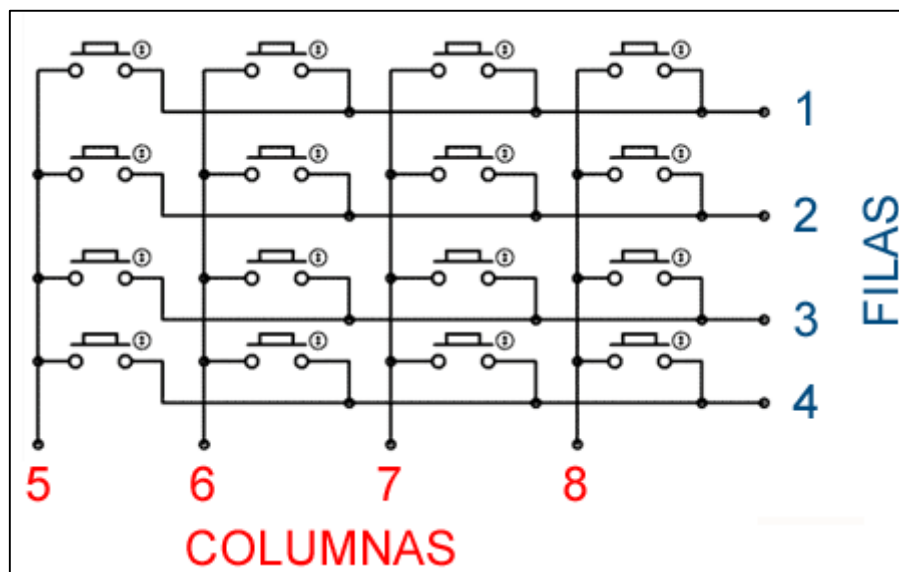


Fig. 15 – Esquema de conexión interna del teclado matricial [15].

Para detectar una tecla pulsada, actuaremos de forma similar a la lectura simple de un pulsador. En resumen, ponemos a tierra un extremo del pulsador, y el otro lo conectamos a una entrada digital con una resistencia de pull-up.

Para leer todas las teclas tendremos que hacer un barrido por filas. En primer lugar ponemos todas las filas a 5V, y definimos todas las columnas como entradas con resistencia de pull-up.

Progresivamente ponemos una fila a 0V, y leemos las entradas de la columna. Una vez realizada la lectura volvemos a ponerla a 5V, pasamos a la siguiente fila, y volvemos a realizar el proceso hasta recorrer todas las filas.

En la siguiente figura se observa el cableado de las filas y de las columnas.

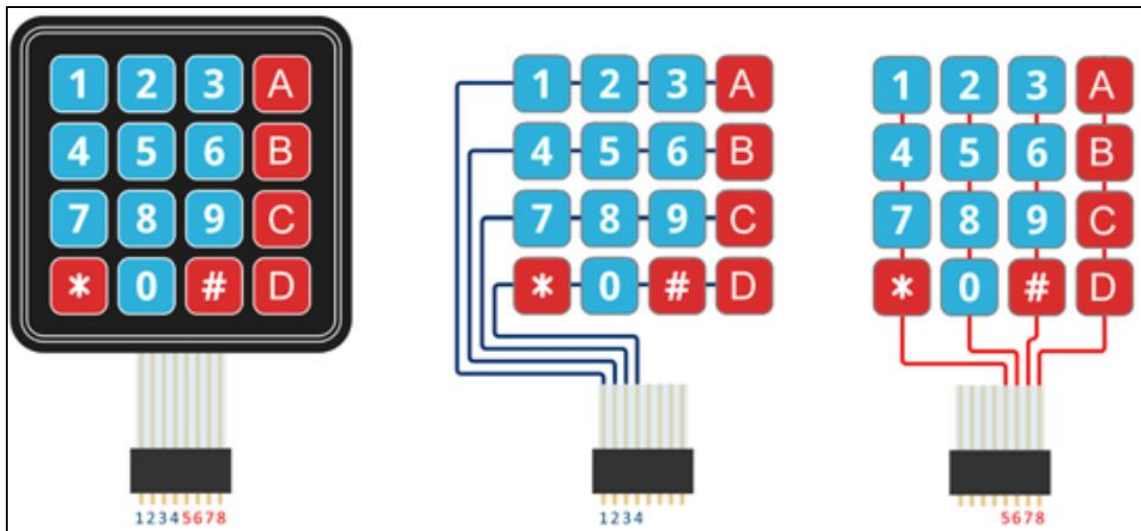


Fig. 16 – Descripción del conexionado interno del teclado matricial utilizado [15].

Empleando el método antes mencionado para el teclado de 4x4, se requiere de 4 entradas y 4 salidas, es decir se necesitan 8 E/S. Luego de una extensa búsqueda de información, se optó por emplear otro método de manejo del teclado. El mismo utiliza solo 1 entrada analógica. Esto redujo en gran cantidad el número de pines necesarios, lo cual es una gran ventaja.

Este método consiste en la utilización de un arreglo de resistencias para distinguir qué botón se ha pulsado mediante la simple lectura analógica de un solo pin.

La idea consiste en construir un divisor de tensión mediante el cual cada botón presionado entregue a la entrada analógica un único valor debido a la caída de tensión que ocasionan sus resistencias asociadas, tanto en filas como columnas. Leyendo este voltaje con el Conversor A/D del PIC podemos llegar a saber qué tecla es la que se ha pulsado.

El conexionado del arreglo de resistores se muestra en la figura 17.

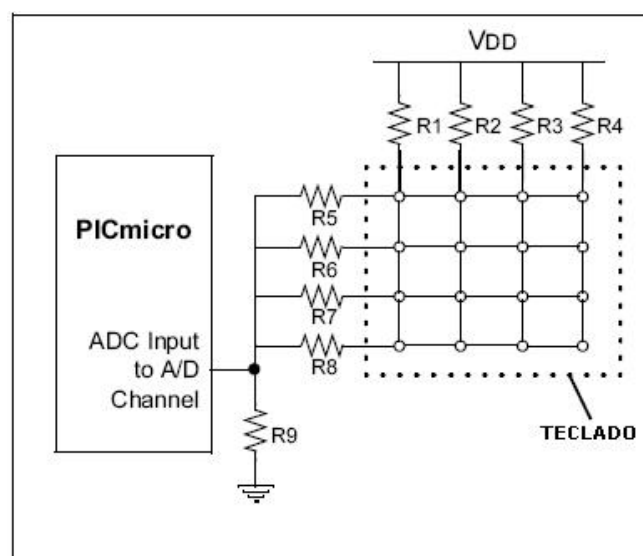


Fig. 17 – Diagrama de conexión empleado para la utilización del teclado matricial por medio de un pin [16]

Como se observa en la figura 17, cada círculo en la rejilla central del teclado del dibujo representa una de las teclas, que al pulsar une una de las resistencias de R1 a R4 conectadas a VDD con otra de R5 a R8 conectadas al PIC. Así si pulsamos en la tecla situada en la esquina superior izquierda tendremos que VDD le llega al PIC tras atravesar R1+R5. Si por el contrario pulsamos la tecla inferior derecha la corriente nos llegará a través de la unión entre R4+R8. Siempre que pulsemos una tecla cualquiera obtendremos un voltaje de caída entre la suma de dos resistencias Rcolumna+Rfila.

Otro detalle a tener en cuenta es que si no pulsamos ninguna tecla nuestro pin del PIC estaría conectado a nada, la línea que une el PIC con las resistencias R5 a R8 y tras ella el vacío. Esto podría, y sería con total seguridad, una verdadera antena que recogería todo lo que pasase cerca de allí, dándonos todo tipo de lecturas falsas mientras no pulsásemos ninguna tecla. Para evitar ese efecto colocamos R9 que mantendrá el pin del conversor conectado a GND mientras no se pulse el teclado.

Pero esta configuración es lo que conocemos como un divisor de tensión, en la que tenemos una resistencia conectada a VDD y otra a GND y nosotros tomamos el valor del voltaje en la unión que hay entre ellas.

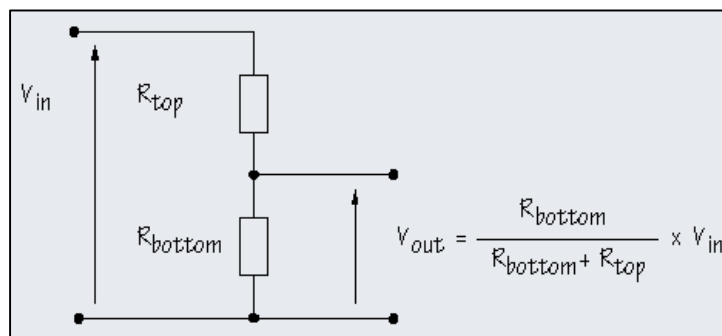


Fig. 18 – Cálculo del potencial eléctrico en un divisor resistivo [17].

Sabiendo que R_{top} es $R_c + R_f$ y que VDD es 5V podemos concluir que

$$V_{out} = \frac{R_9}{R_9 + R_c + R_f} * 5V$$

Y así tendremos un valor de V_{out} para cada pareja de resistencias $R_c + R_f$.

Con esta información se ha construido una tabla Excel en la que se muestra primero la tabla de resistencias de columnas y filas y las distintas sumas de cada una de ellas. Después otra con los distintos voltajes que se generan en el divisor de tensión con cada una de las parejas anteriores. Y por último otra tabla en la que se hace corresponder cada uno de estos voltajes con el valor de la conversión AD del PIC con precisión de 10 bits.

		0R	470R	1000R	2200R				
		R1 Col1	R2 Col2	R3 Col3	R4 Col4				
220R	R5 Fila1	220R	690R	1220R	2420R	1	865	1	62
330R	R6 Fila2	330R	800R	1330R	2530R	4	803	2	67
470R	R7 Fila3	470R	940R	1470R	2670R	7	736	3	38
560R	R8 Fila4	560R	1030R	1560R	2760R	0	698	4	48
						2	650	5	36
						5	614	6	40
						8	574	7	23
1200R	R9 Pull-Down	Vout	Vout	Vout	Vout	STOP	551	8	43
5V	Vin	4,225V	3,175V	2,479V	1,657V	3	508	9	22
		3,922V	3,000V	2,372V	1,609V	6	486	10	25
		3,593V	2,804V	2,247V	1,550V	9	460	11	15
		3,409V	2,691V	2,174V	1,515V	STOP	445	12	106
		CAD	CAD	CAD	CAD	F1	339	13	10
1024	CAD Pres. 10 bits	865	650	508	339	F2	329	14	12
		803	614	486	329	F3	318	15	7
		736	574	460	318	F4	310	16	310
		698	551	445	310				

Tabla 3 - Valores de resistencia, voltaje y su equivalente digital al presionar cada pulsador [17].

Como se observa, tenemos abajo los valores que vamos a obtener en la conversión AD para cada tecla pulsada. Son valores razonablemente separados unos de otros y que nos pueden permitir leer nuestro teclado con un único pin del PIC (con AD) que es lo que queríamos hacer.

Luego, con un algoritmo se observa en que intervalo se encuentra la medición A/D con lo cual obtenemos la tecla pulsada, utilizando solo 1 pin del microcontrolador.

• **PULSADORES DE NAVEGACION**

La función de este grupo de pulsadores es navegar en las distintas pantallas del menú del dispositivo, accediendo a las diferentes opciones y submenús que brinda el programa como se observa en el diagrama de bloques de la figura 19.

Los pulsadores ubicados a la izquierda tienen la función de moverse en forma ascendente y descendente dentro de las opciones de cada pantalla o submenú.

Los ubicados en la parte inferior tienen la función de acceder a cada opción contenida en cada pantalla (derecha) y volver hacia atrás, es decir a la pantalla anterior (izquierda).



Fig. 19 – Detalle de la pantalla y pulsadores de navegación del primer prototipo.

- **MEMORIA SD**

Una tarjeta SD (Secure Digital) es una pequeña tarjeta de memoria que permite guardar información en dispositivos portátiles como teléfonos móviles, cámaras digitales o tablets. Son una de las muchas tarjetas de memoria existentes en el mercado. Las más conocidas gracias a su alta implantación en el mercado, a su estandarización y a los precios que no han dejado de bajar con el paso del tiempo.

En el presente trabajo, la función de la memoria SD es la de almacenar la información contenida en cada medición realizada por el dispositivo (potencial ON, potencial OFF, coordenadas, fecha y hora), para luego poder visualizar esta información con un software en un ordenador. Para esto basta solo con retirar la memoria del MPS y luego conectarla en la PC para su visualización y posterior análisis.

Las tarjetas SD se diferencian por sus medidas, su capacidad para almacenar contenidos y la velocidad a la que transmiten y copian los datos.

Una de las claves fundamentales para el gran éxito de las tarjetas SD ha sido la gran sencillez de uso, **apenas insertar en la respectiva ranura y funcionar**. También son muy duraderas, retrocompatibles, pequeñas y económicamente accesibles.

Para este proyecto se ha elegido una memoria SD de 2Gb de capacidad.

La misma posee las siguientes características físicas:

- Tamaño: 32x24x2.1mm
- Peso aproximado: 2gr

A continuación se muestra una imagen de la memoria SD.



Fig. 20 – Imagen de una memoria SD.

- **GPS – SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL**

El **Global Position System** (GPS) o Sistema de Posicionamiento Global (más conocido con las siglas GPS, aunque su nombre correcto es NAVSTAR-GPS) es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una nave, con una precisión hasta de centímetros, usando GPS diferencial, aunque lo habitual son unos pocos metros. A modo de ejemplo en la figura 21 se observa un diagrama de triangulación. También se consigue una exactitud extrema en el reloj del GPS, similar a la de los relojes atómicos que llevan a bordo cada uno de los satélites.

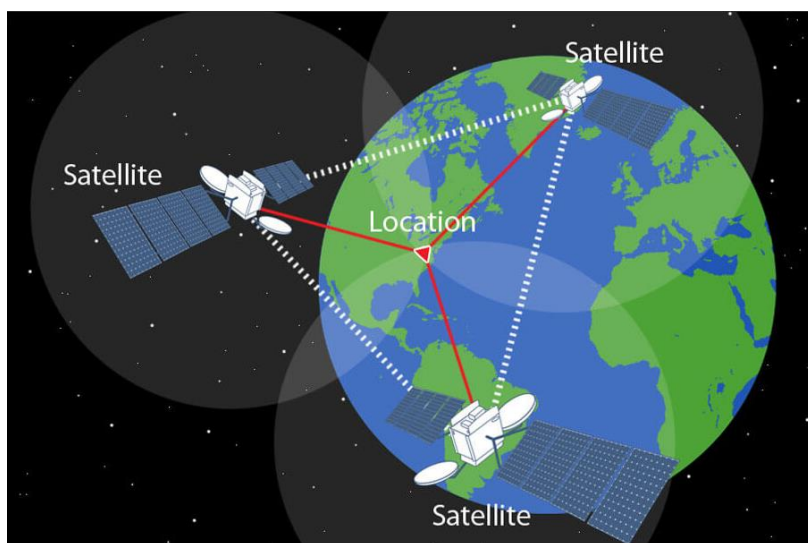


Fig. 21 – Esquema de triangulación GPS [18].

La precisión intrínseca del sistema GPS depende del número de satélites visibles en un momento y posición determinados. Con un elevado número de satélites siendo captados (7, 8 o 9 satélites), y si éstos tienen una geometría adecuada, es decir están dispersos, pueden obtenerse precisiones inferiores a 2,5 metros en el 95% del tiempo.

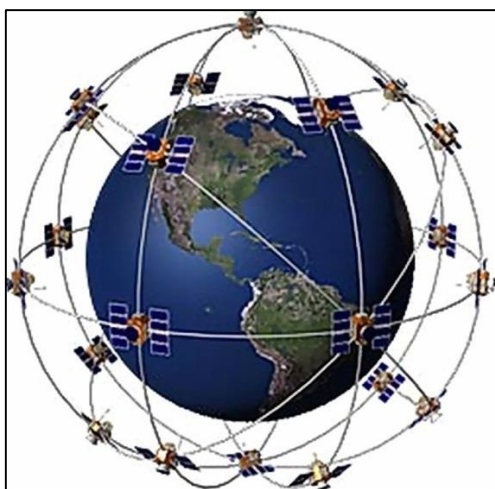


Fig. 22.a – Representación visual de la constelación de satélites GPS [19].

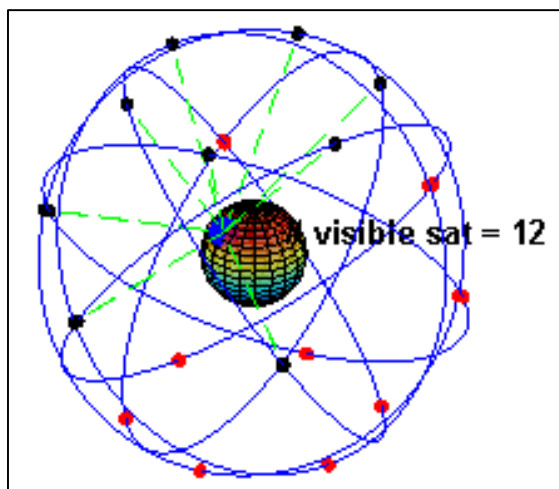


Fig. 22.b – Ejemplo número de satélites visibles desde un determinado punto de la superficie de la Tierra [20].

Considerando la necesidad de registrar la posición y el momento en que se toman las mediciones, es que se incorpora al equipo de Medición de Potencial Sincronizado el módulo receptor GPS.

Las mediciones de potencial están asociadas con sus coordenadas geográficas para la posterior identificación de zonas críticas. Para cada punto se deben medir dos potenciales caño-suelo, uno es el de corriente encendida (potenciales "ON") el otro es de corriente apagada (potenciales "OFF"). Para realizar éstas mediciones se deben colocar interruptores en los rectificadores que conforman el sistema de protección catódica de la tubería bajo inspección. Dichos interruptores permitirán apagar-encender en forma cíclica y "sincronizada" a tales rectificadores.

De ésta manera se tienen por un lado a los rectificadores encendiéndose y apagándose en forma sincrónica por medio del interruptor, y también en forma sincrónica el colector de datos (Móvil), Medidor de Potencial Sincronizado, deberá tomar mediciones para el estado ON y para el OFF.

La sincronización del sistema se llevó a cabo colocando receptores de GPS en cada unidad, tanto en los interruptores de corriente como en el equipo MPS.

El módulo receptor GPS utilizado pertenece a la marca GARMIN, modelo GPS18xLVC, el mismo se puede visualizar en la figura 23. Se optó por la utilización del mismo debido a que es el modelo elegido por la empresa Petromark en general para todos sus equipos, son prácticos y de fácil acceso. Algunas características son: es pequeño, potente y con la antena integrada. Conseguirá datos cada un segundo, se alimenta con 5v y se comunica por serie.



Fig. 23 – Módulo receptor GPS, marca GARMIN, modelo GPS 18X LVC (imagen tomada de la hoja de datos).

Garmin GPS 18X LVC:

- La conexión viene con los cables en condiciones para poder conectarlo al dispositivo que se desee, el conexionado se puede observar en la figura 24.
- La salida de datos se puede recibir en el formato estándar NMEA 0183 o en el formato propietario de Garmin.
- Longitud del cable: 5 m.

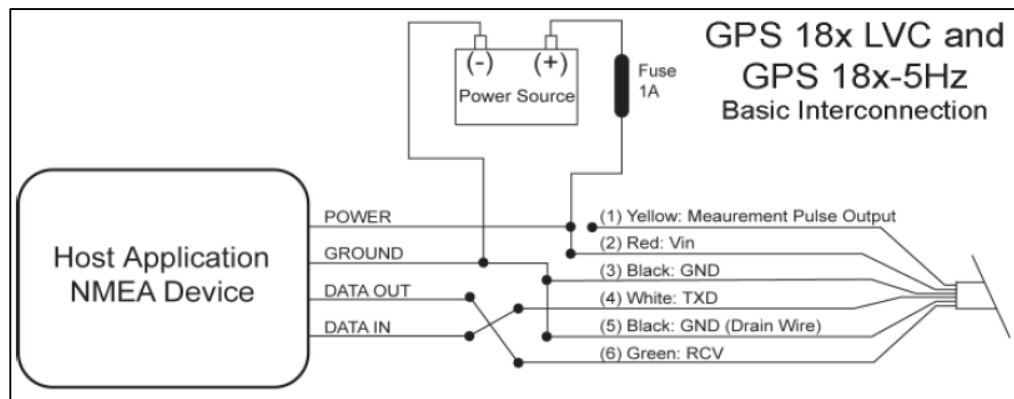


Fig. 24 – Diagrama de conexionado GPS 18Xlvc con dispositivo.

Especificaciones técnicas:

Peso aproximado: 160g

Voltaje de alimentación: 4 – 5,5Vdc

Corriente de alimentación: 90mA @ 5 Vdc

Niveles de salida serial CMOS: 0 Vdc a Vent (entre 4 y 5,5Vdc)

Frecuencia de actualización: 1 recepción por segundo

Exactitud: - Servicio de posicionamiento estándar de GPS (SPS):

Posición: <15 metros en el 95% del tiempo.

- Tiempo de salida de pulso de medición:

±1 µs en el flanco ascendente del pulso.

Los datos que recibiremos en nuestro modulo GPS siguen el protocolo NMEA. La **National Marine Electronics Association** (NMEA) es una organización estadounidense que establece estándares de comunicación electrónica marítima.

Su protocolo NMEA 0183 es el que utilizan habitualmente los receptores GPS.

Cada trama comienza con: \$GP y le siguen: RMC, GGA, GSA, GSV y otros, que nos indican qué tipo de datos contiene esa trama. A continuación los campos propios de ese tipo de mensaje y finalmente: * y el Checksum. El mensaje termina con <CR><LF>.

A continuación se observa un listado con los diferentes tipos de tramas existentes.

\$GPBOD	- Bearing, origin to destination
\$GPBWC	- Bearing and distance to waypoint, great circle
\$GPGGA	- Global Positioning System Fix Data
\$GPGLL	- Geographic position, latitude / longitude
\$GPGSA	- GPS DOP and active satellites
\$GPGSV	- GPS Satellites in view
\$GPHDT	- Heading, True
\$GPR00	- List of waypoints in currently active route
\$GPRMA	- Recommended minimum specific Loran-C data
\$GPRMB	- Recommended minimum navigation info
\$GPRMC	- Recommended minimum specific GPS/Transit data
\$GPRTE	- Routes
\$GPTRF	- Transit Fix Data
\$GPSTN	- Multiple Data ID
\$GPVBW	- Dual Ground / Water Speed
\$GPVTG	- Track made good and ground speed
\$GPWPL	- Waypoint location
\$GPXTE	- Cross-track error, Measured
\$GPZDA	- Date & Time

Fig. 25 – Listado de tramas existentes en el protocolo NMEA.

Como se observa existen diferentes tipos de tramas, cada una con información útil. En este trabajo nos centramos solo en la trama **\$GPGGA** (Global Positioning System Fixed Data) es decir “Sistema global de posicionamiento de datos fijos”, ya que contiene toda la información necesaria para nuestra aplicación, las mismas tienen la estructura que se observa en la Tabla 4.

A continuación se muestra a modo de ejemplo de una trama **\$GPGGA** y su posterior desglose y traducción:

\$GPGGA,161229.487,3723.2475,N,12158.3416,W,1,07,1.0,9.0,M,,,0000*18

La cual se traduce como:

\$GPGGA – Identificador del Mensaje (**Global Positioning System Fixed Data**)

161229.487 – Hora UTC en formato hhmmss.sss (**16:12:29.487**)

3723.2475 – Latitud en formato ddmm.mmmm (**37° 23.2475'**)

N – Indicador Norte o Sur (**Norte**)

12158.3416 – Longitud en formato dddmm.mmm (**121° 58.3416'**)

W – Indicador Este u Oeste (**West = Oeste**)

1 – Indicador de validez de la posición: (referido a la Tabla 5)
(**Posición válida en Modo SPS (Standard Positioning System)**)

07 – Número de satélites usados (**7**)

1.0 – HDOP: Dilución horizontal de la precisión. Es una indicación de la precisión de la medida horizontal. (**Excelente**)

- <1: Ideal
- 1-2: Excelente
- 2-5: Buena
- 5-10: Moderada
- 10-20: Aproximada
- >20: Pobre

9.0 – Altitud sobre el nivel del Mar (**9 metros**)

M – Unidad de la Altitud. (**M = metros**)

„„ – Segundos de antigüedad de la corrección diferencial.
(Campos nulos cuando no se usa el DGPS.)

0000 – ID de la Estación de Referencia Diferencial

***18** – Checksum (se usa para asegurar la integridad de los datos)

Field	Structure	Description	Symbol	Example
1	\$GPGLGA	Log header. See Messages for more information.		\$GPGLGA
2	utc	UTC time status of position (hours/minutes/seconds/ decimal seconds)	hhmmss.ss	202134.00
3	lat	Latitude (DDmm.mm)	llll.ll	5106.9847
4	lat dir	Latitude direction (N = North, S = South)	a	N
5	lon	Longitude (DDDmm.mm)	yyyyy.yy	11402.2986
6	lon dir	Longitude direction (E = East, W = West)	a	W
7	quality	refer to Table: GPS Quality Indicators	x	1
8	# sats	Number of satellites in use. May be different to the number in view	xx	10
9	hdop	Horizontal dilution of precision	x.x	1.0
10	alt	Antenna altitude above/below mean sea level	x.x	1062.22
11	a-units	Units of antenna altitude (M = metres)	M	M
12	undulation	Undulation - the relationship between the geoid and the WGS84 ellipsoid	x.x	-16.271
13	u-units	Units of undulation (M = metres)	M	M
14	age	Age of correction data (in seconds) The maximum age reported here is limited to 99 seconds.	xx	(empty when no differential data is present)
15	stn ID	Differential base station ID	xxxx	(empty when no differential data is present)
16	*xx	Check sum	*hh	*48
17	[CR][LF]	Sentence terminator		[CR][LF]

Tabla 4 – Descripción de la trama \$PGGA.

Indicador	Descripción
<1	Ideal
1-2:	Excelente
2-5:	Buena
5-10:	Moderada
10-20:	Aproximada
>20	Pobre

Tabla 5 – Tabla de indicadores de calidad de GPS.

La combinación del método IOP con el sistema de posicionamiento global, la tecnología GPS (global positioning system), permite que las medidas obtenidas de potencial sean de mayor precisión que las que se obtienen mediante la utilización de interruptores de corriente sincronizados, sin utilizar la tecnología GPS.

El paso de un *string* (cadena), o un conjunto de *chars* (caracteres) como el siguiente:

\$GPGGA,161229.487,3723.2475,N,12158.3416,W,1,07,1.0,9.0,M,,,0000*18

A una asignación de variables como:

GPS.hora = 16; GPS.longitud = 121° 58.3416' ; Etc...

Es un proceso que se denomina “Parseado”, esto se realiza mediante un algoritmo configurado en el microcontrolador. El algoritmo primero espera recibir una trama del tipo que nos interesa (\$GPGGA), consultando carácter por carácter hasta estar en presencia de una. En ese momento se consulta si se recibe una coma “,” ya que como se mencionó anteriormente, las mismas separan los datos. Luego se almacenan solo los datos que nos interesan para este proyecto en variables internas para luego ser almacenadas en la memoria SD, los mismos son:

- Hora UTC en formato hhmmss.sss
- Latitud en formato ddmm.mmmm
- Indicador Norte o Sur
- Longitud en formato dddmm.mmm
- Indicador Este u Oeste

- **BASTONES DE MEDICION**

Como se explicó anteriormente, en el apartado 2.4, los bastones usados para estudios CIPS permiten al inspector medir potencial suelo-cañería en cada paso durante el estudio.

Petromark nos suministró los bastones necesarios para el equipo.

Los bastones de medición están compuestos por un electrodo de referencia (Fig.27), en este caso de Cu-CuSO₄, ubicado en la parte inferior, un mango ubicado en la parte superior que sirve para agarrar el bastón y que posee un pulsador (botón-contacto) que al presionarlo cierra el circuito y se toma la medición, una extensión que sirve simplemente para ubicar el mango en una posición cómoda (ergonómica) para el usuario y un terminal superior que sirve para conectar el bastón con el colector de datos (MPS). Como se detalla en la Figura 26.

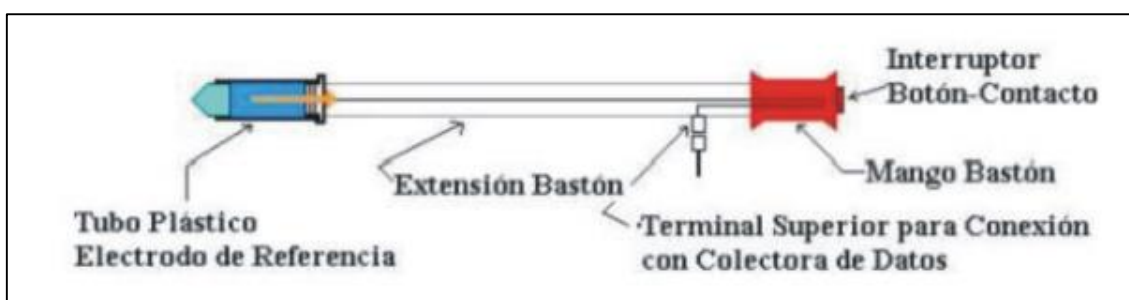


Fig. 26 – Detalle de construcción del electrodo de referencia [21].

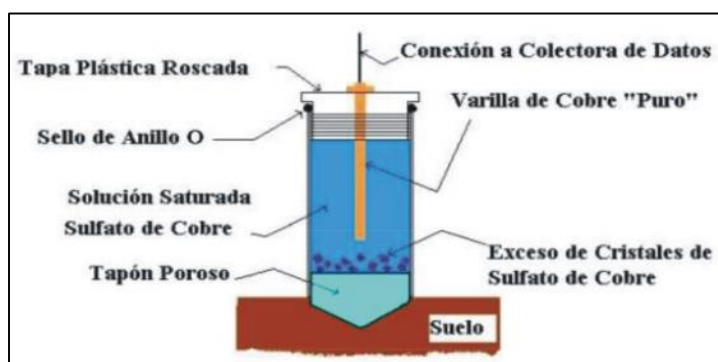


Fig. 27 – Detalle de construcción del electrodo de referencia de Cu-CuSO₄ [21].



Fig. 28 – Detalle de construcción del electrodo de referencia de Cu-CuSO₄ [21].

- **POWER BANK (BANCO DE ENERGIA)**

Para proveer la energía necesaria al equipo se implementó un *Power Bank* (Banco de Energía), porque su utilización se realiza lejos de fuentes de energía necesitando autonomía, obteniéndola de las baterías de litio contenidas en el Power Bank y porque dispone de circuitos de protección contra sobrecorriente y cortocircuito de manera que el dispositivo está protegido.

Se eligió el modelo de 20000mAh dual USB de la marca Samsung, por su capacidad, por sus dimensiones cómodas para acoplarlo al equipo, por su indicador led de encendido y por ser la marca recomendada por el mercado, Figura 29.



Fig. 29 – Power Bank 20000mAh, marca Samsung [23].

- **1° PROTOTIPO**

Para la realización de las pruebas, se utilizó un instrumental rústico, ya que se perseguía el objetivo de comprobar el funcionamiento adecuado de cada parte del hardware antes mencionada, sin tener en consideración el aspecto estético del mismo sino su funcionalidad. Ejemplos:

- Tomar las primeras muestras con el conversor analógico/digital y contrastarlas con instrumental calibrado.
- Probar el funcionamiento del teclado matricial 4x4 utilizado con un solo pin.
- Observar el display, realizando las modificaciones necesarias para su óptimo funcionamiento.

PLACA BASE

Para el desarrollo de la placa se utilizó el software de diseño de circuitos electrónicos y placas impresas PROTEUS profesional 8.0.

La placa base cumple la función de servir de soporte físico y brindar conexión al zócalo de montaje del PIC con el resto de los módulos y periféricos (placas adicionales, GPS, teclado matricial, entre otros), como lo muestra la imagen.

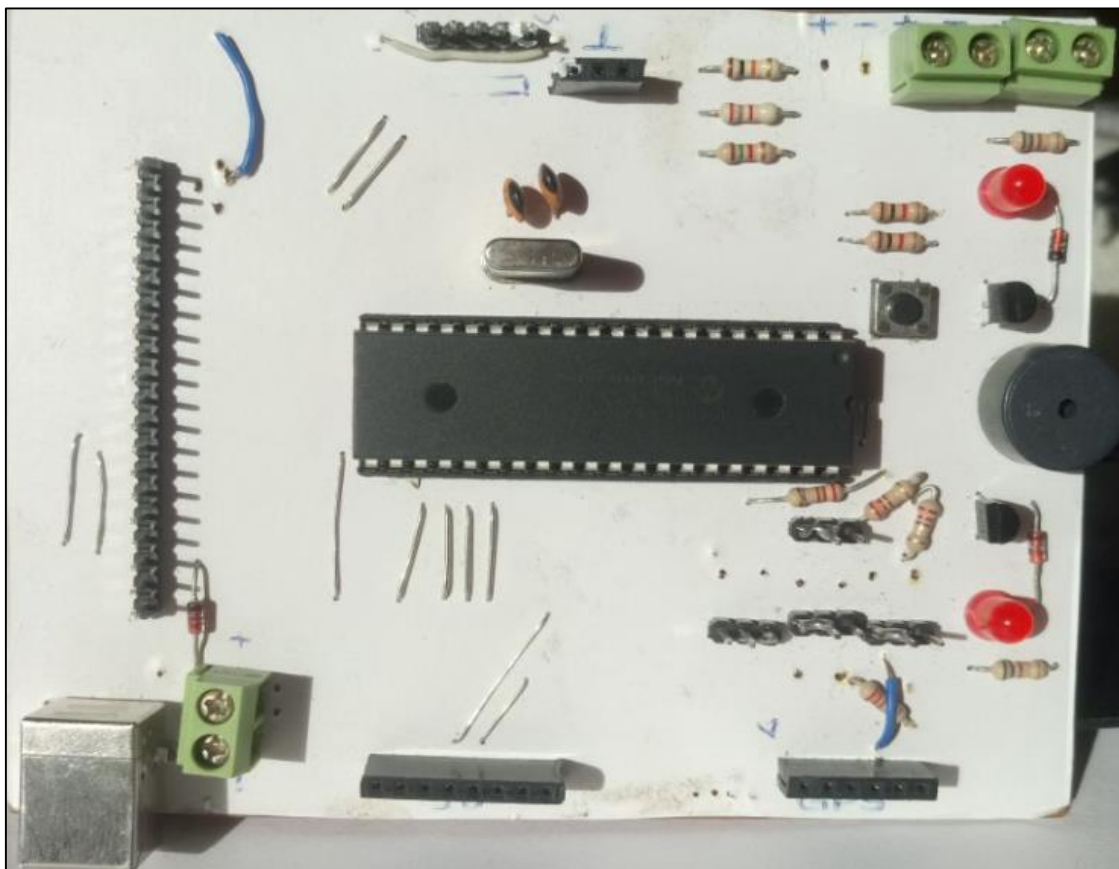
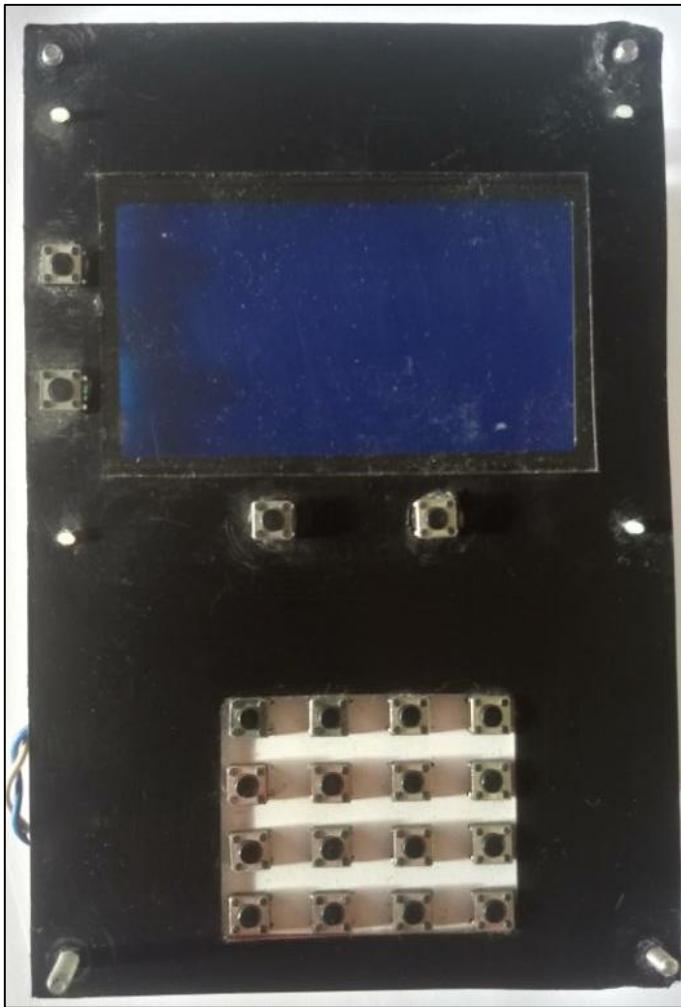


Fig.30 – Foto de la placa base, primer prototipo.

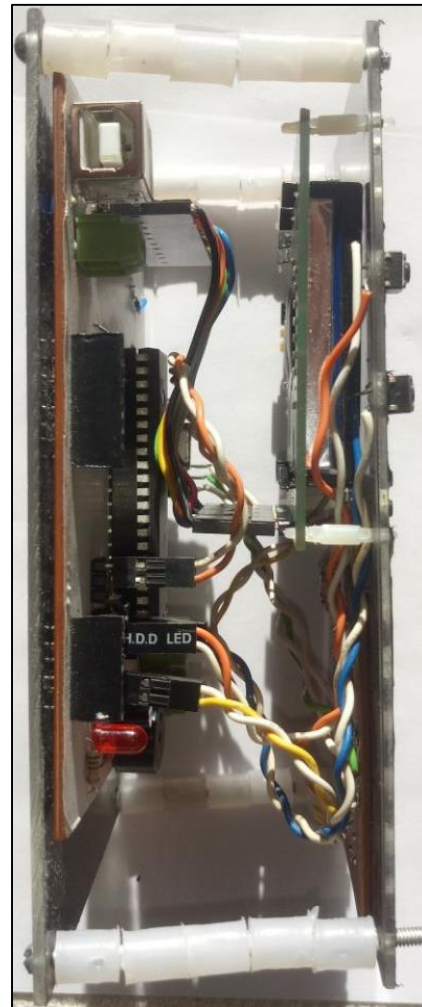
GABINETE

El gabinete del primer prototipo realizado consistió en: parte frontal y posterior del mismo realizadas con placas de acrílico adaptadas al tamaño del MPS y necesidades de conexiones posteriores. Los laterales quedaron abiertos con el fin de seguir proyectando dentro del dispositivo los elementos necesarios para su posterior funcionamiento.

Este primer prototipo se muestra en la siguiente figura.



*Fig. 31.a - Vista frontal del equipo MPS
(Primer prototipo)*



*Fig. 31.b – Vista lateral del equipo MPS
(Primer prototipo)*

- **2° PROTOTIPO**

PLACA BASE

Para el desarrollo de la placa del segundo prototipo, utilizando el software PROTEUS, se tuvo en cuenta tanto lo funcional como también lo estético.

Partiendo de la base de la placa diseñada con anterioridad (Figura 30), se obtiene el nuevo diseño. Se tuvieron en cuenta las dimensiones y forma del gabinete seleccionado.

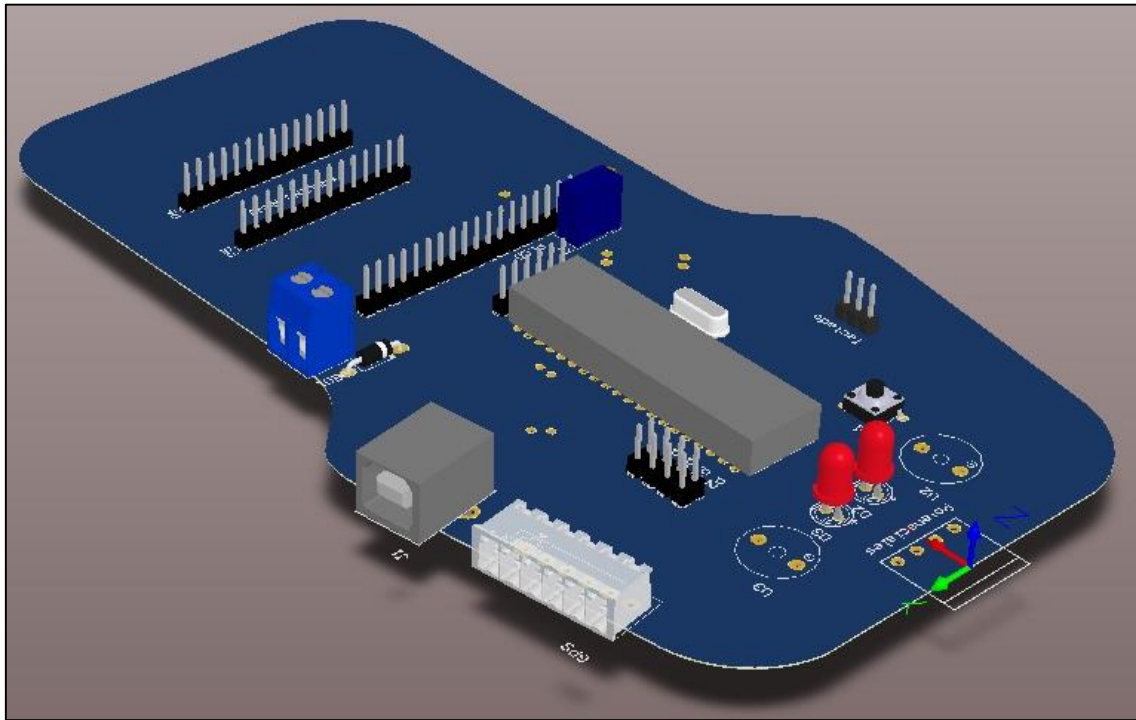


Fig. 32 – Imagen 3D tomada del software de diseño PROTEUS.

Como se observa en la Figura 33.b, las borneras (de color verde) responden a la necesidad de conexión de diversos terminales y hardware asociado, previamente detallados, para el funcionamiento del equipo. En la parte inferior de la imagen se observa un modulo para la lectura de tarjeta SD. En el lado superior derecho de la placa, un conector USB tipo B1 para la alimentacion del equipo, 5VDC entregada por el banco de baterias antes mencionado. Todos los terminales mencionados anteriormente se encuentran ubicados estrategicamente para lograr la comodidad funcional del equipo.

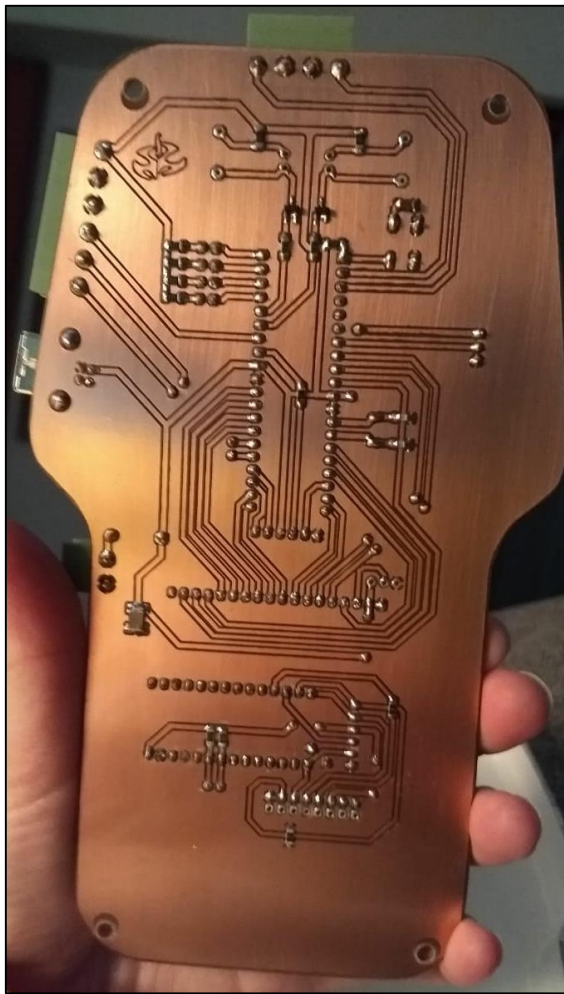


Fig. 33.a – Foto de la placa de control, lado inferior (pistas conductoras).

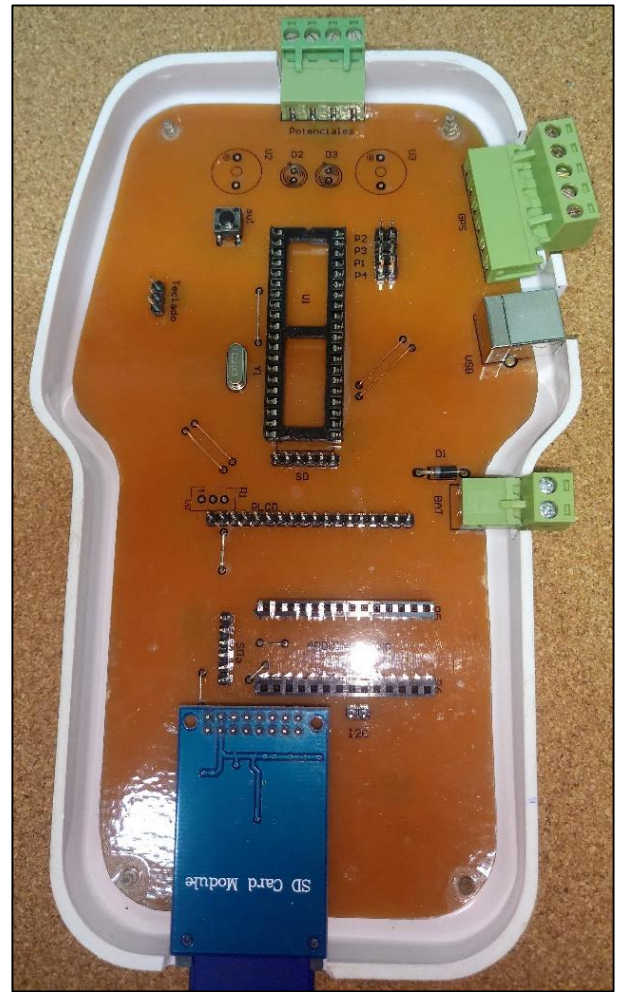


Fig. 33.b - Foto de la placa de control, lado superior (componentes electrónicos).

GABINETE

Para optimizar la primera versión antes descrita, se tuvieron en consideración los siguientes aspectos:

- **Robustez:** se implementó un material de mayor firmeza para lograr mayor resistencia, ya que este instrumental se utiliza en ambientes adversos.
- **Ergonomía:** se diseñó una herramienta de modo que se adapte mejor a las características anatómicas del operario del instrumental.
- **Estética:** se buscó lograr un producto final con características de diseño similares a los existentes en el mercado.



Fig. 34 – Vista frontal del 2º prototipo del MPS.

En este modelo terminado, tanto lo funcional como lo estético se demuestran en el aspecto armonioso del equipo.



Fig. 35 - Vista lateral-superior del 2º prototipo del MPS.

Los terminales de conexión, antes detallados, se presentan de color verde en el lado derecho favoreciendo la utilización del operario de campo.



Fig. 36 – Vista inferior del 2º prototipo del MPS.

En la parte inferior, la ranura de inserción de la memoria SD.

3.2. Diseño del Software

Sus funciones son el control del display grafico GLCD y navegación dentro del menú, la lectura de los puertos ADC para la medición de potenciales ON-OFF y para la lectura del teclado matricial, la lectura de tramas GPS y parseado de las mismas; el almacenamiento en la memoria SD de los valores de coordenadas, potencial on, potencial off, fecha y hora para su posterior análisis en una PC; por último la lectura de los pulsadores de movimiento entre las pantallas del menú.

El software se configuro en la plataforma de desarrollo MPLAB, en el lenguaje de programación C. Se utilizó el tipo de programación tipo *multitasking*, es decir multitarea. La opción más viable para implementar características multitarea en sistemas embebidos de pocos recursos es utilizar un paradigma de programación cooperativa. En este tipo de implementación de multitarea, son los propios procesos que ceden el uso del procesador a intervalos regulares, en vez de ser interrumpidos por el planificador de un sistema operativo. Con esta programación se obtiene un resultado eficiente y esperado acorde a las necesidades del programa.

Mapa de navegación del menú

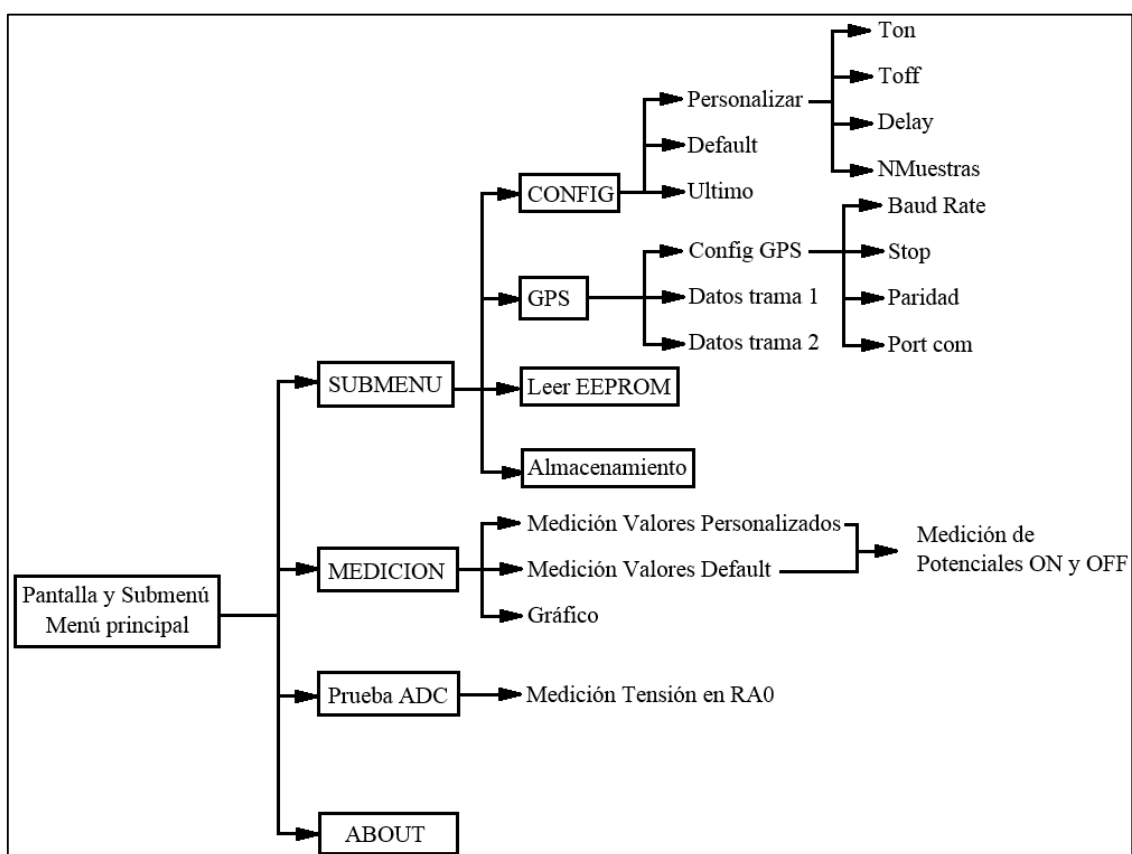


Fig. 37– Mapa de navegación del menú.

Al encender el equipo se visualizara la pantalla de inicio en la cual se observa el nombre del dispositivo.

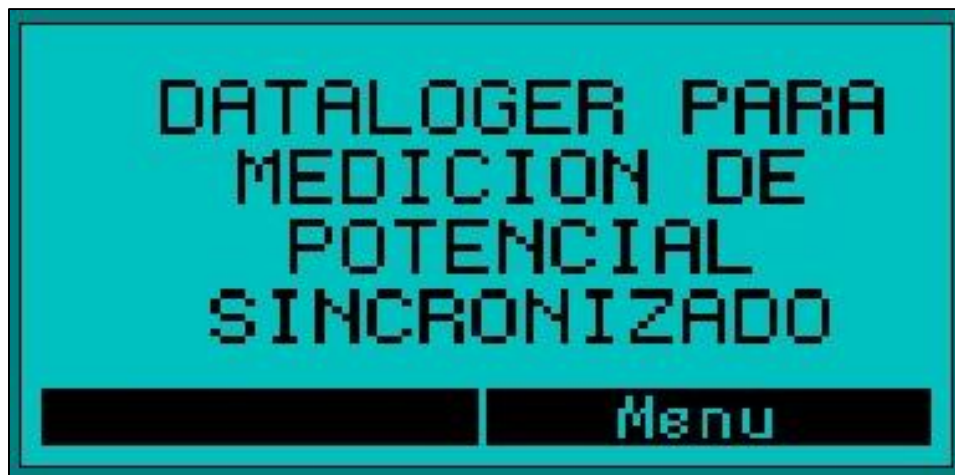


Ilustración 1 – Pantalla Principal.

Al presionar el pulsador derecha se ingresa al menú principal, observando el listado de opciones que se muestra en la siguiente imagen. Los pulsadores ubicados a la izquierda de la pantalla permiten el desplazamiento entre las opciones del menú, hacia arriba y hacia abajo. Las opciones que se visualizarán serán las siguientes:

1. **Submenú:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 3.
2. **Medición:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 5.
3. **Prueba ADC:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 6 en la cual se muestra el valor de tensión en la entrada analógica ubicada en el pin RA0 en tiempo real.
4. **About:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 7 en la cual se escribe el nombre de los autores del proyecto.

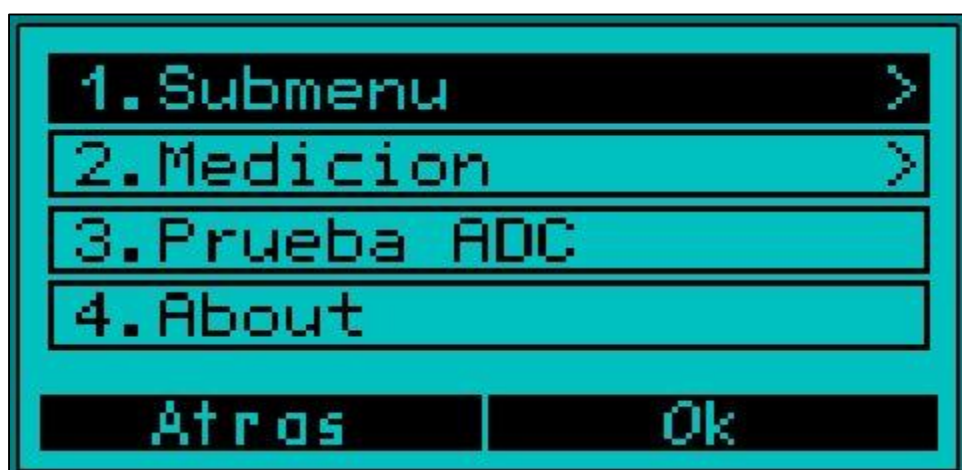


Ilustración 2



Ilustración 3

Al ingresar en la pantalla que se muestra en la Ilustración 3 tenemos las opciones que se detallan a continuación:

- 1.1 Configuración:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 4.
- 1.2 GPS:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 6.
- 1.3 Leer EEPROM:** al aceptar esta opción, se realizara una lectura de la memoria EEPROM.
- 1.4 Almacenamiento:** Esta opción sirve para almacenar los datos en la memoria SD.

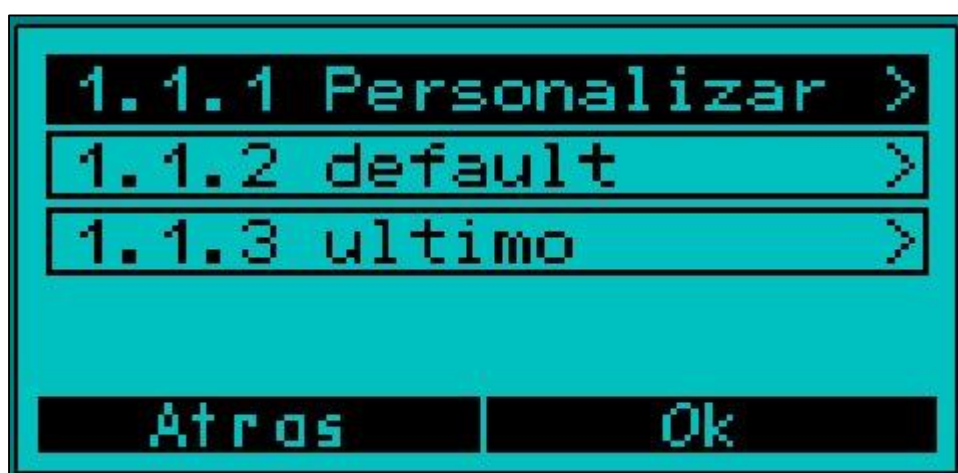


Ilustración 4

- 1.1.1 Personalizar:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 5, en la cual se podrán setear los parámetros relacionados a la medición de potencial, tales como Ton, Toff, Delay, NMuestras.
- 1.1.2 Default:** al aceptar esta opción se escoge realizar las mediciones de potencial utilizando los parámetros por defecto.
- 1.1.3 Ultimo:** al aceptar esta opción se escoge realizar las mediciones de potencial utilizando los últimos parámetros cargados en “Personalizar”.

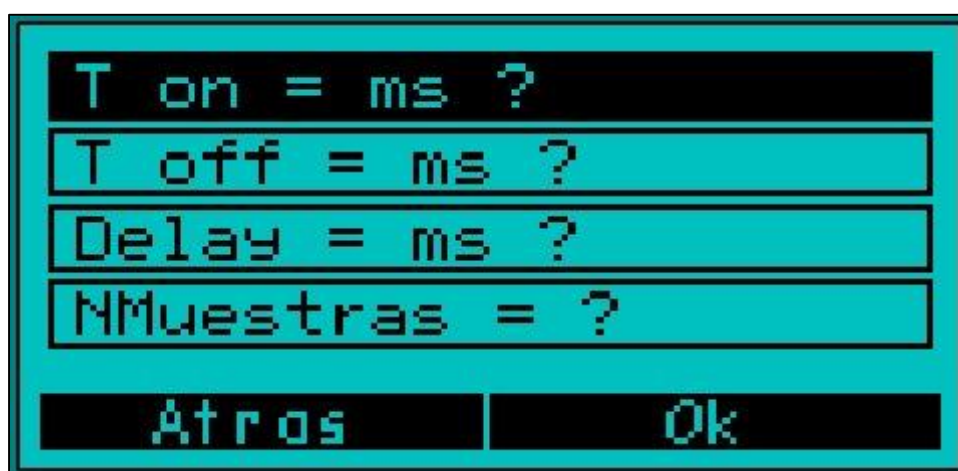


Ilustración 5

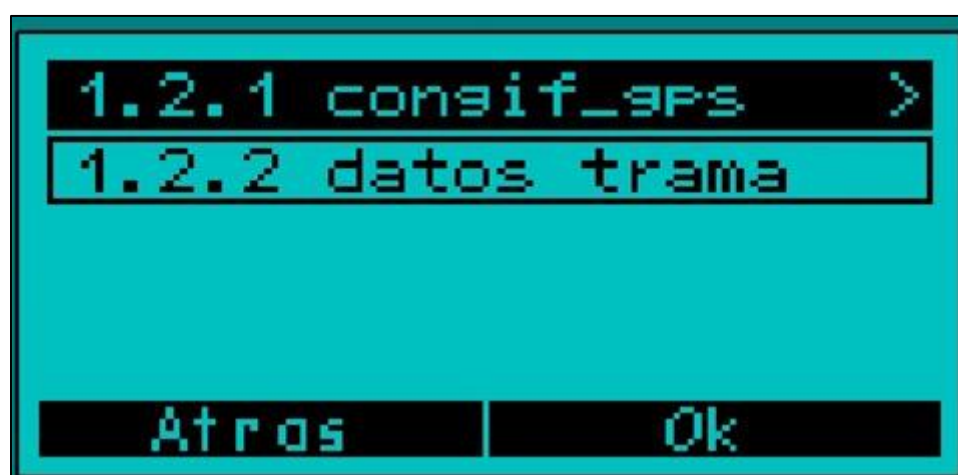


Ilustración 6

- 1.2.1 **Configuración GPS:** al aceptar esta opción se abrirá la pantalla que se observa en la Ilustración 7, en la cual se podrán setear los parámetros relacionados al módulo de GPS, tales como *Baud Rate* (velocidad de transmisión), Stop, Paridad y Port Com.
- 1.2.2 **Datos trama:** al aceptar esta opción se puede visualizar una trama del módulo GPS, del tipo \$GPGGA, y de esta manera comprobar el buen funcionamiento módulo.



Ilustración 7

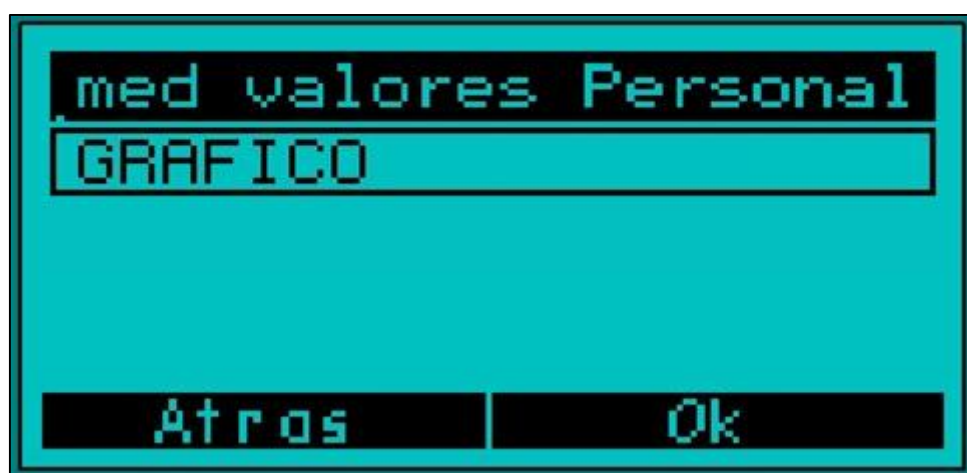


Ilustración 8

Medición valores personalizados: opción para comenzar un ciclo de mediciones de potencial ON-OFF, ingresando a la pantalla que se muestra en la ilustración 9 en la cual se observan cada una de las mediciones realizadas a medida que se van adquiriendo. Esto se realiza accionando un pulsador ubicado en el bastón de medición.

Gráfico: opción para visualizar una gráfica de los valores de potencial medidos por el equipo.



Ilustración 9



Ilustración 10

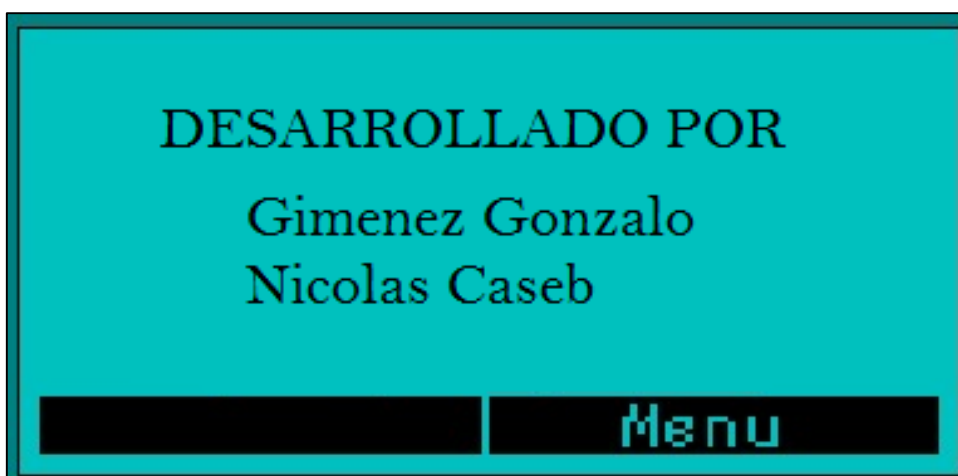


Ilustración 11

4.1. Resultados y mediciones

Considerando que el instrumento ya contaba con los elementos necesarios y en funcionamiento para obtener los primeros resultados de medición en laboratorio, es que se procede a realizar las primeras pruebas, contrastando el equipo contra un tester de la marca Amprobe, modelo 37XR-A (elemento de medición calibrado y de primera línea).

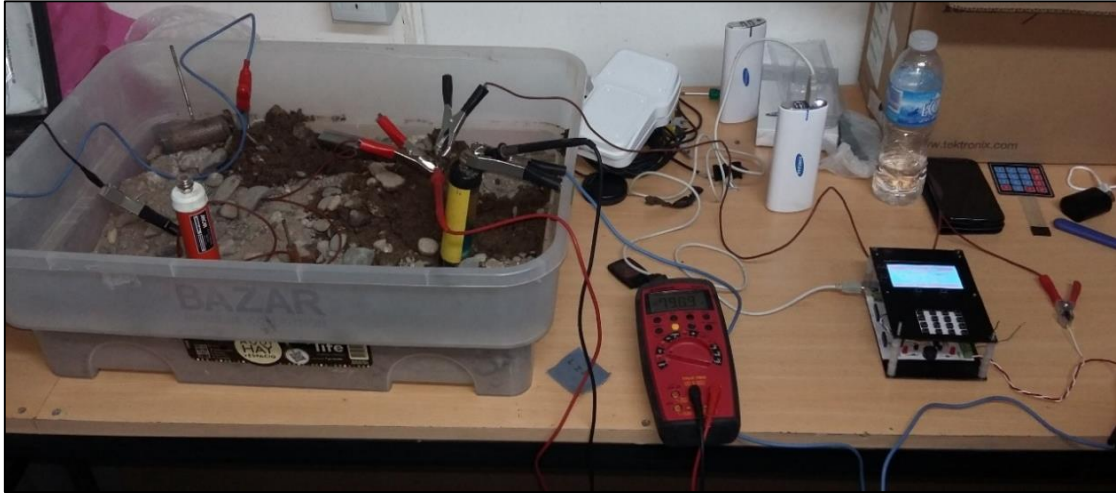


Fig. 37 – Foto del momento de medición en laboratorio, contrastando el MPS con un multímetro Amprobe 37XR-A.

El instrumental tomó las primeras muestras en un ambiente artificial, como se observa en la Figura 39, simulado por una cuba que contiene tierra, un caño galvanizado enterrado en la misma que simula ser la cañería a inspeccionar, ésta a su vez tiene soldado un vástago metálico que sale (asoma) por sobre la superficie de la tierra que reproduce el poste de prueba, un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre (Cu-CuSO_4) y un cilindro de acero que hace las veces de ánodo auxiliar. Además se utilizó una fuente de alimentación de corriente continua para proveer la energía necesaria al circuito, la que se puede observar en la Figura 38.



Fig. 38 – A la izquierda de la imagen se puede observar la fuente de alimentación utilizada para las pruebas.

Todos los elementos antes mencionados se interconectaron entre sí y con los instrumentos de medición por medio de cables que poseen fichas cocodrilo en los extremos, para lograr formar el circuito equivalente que se detalla en la ilustración 12.

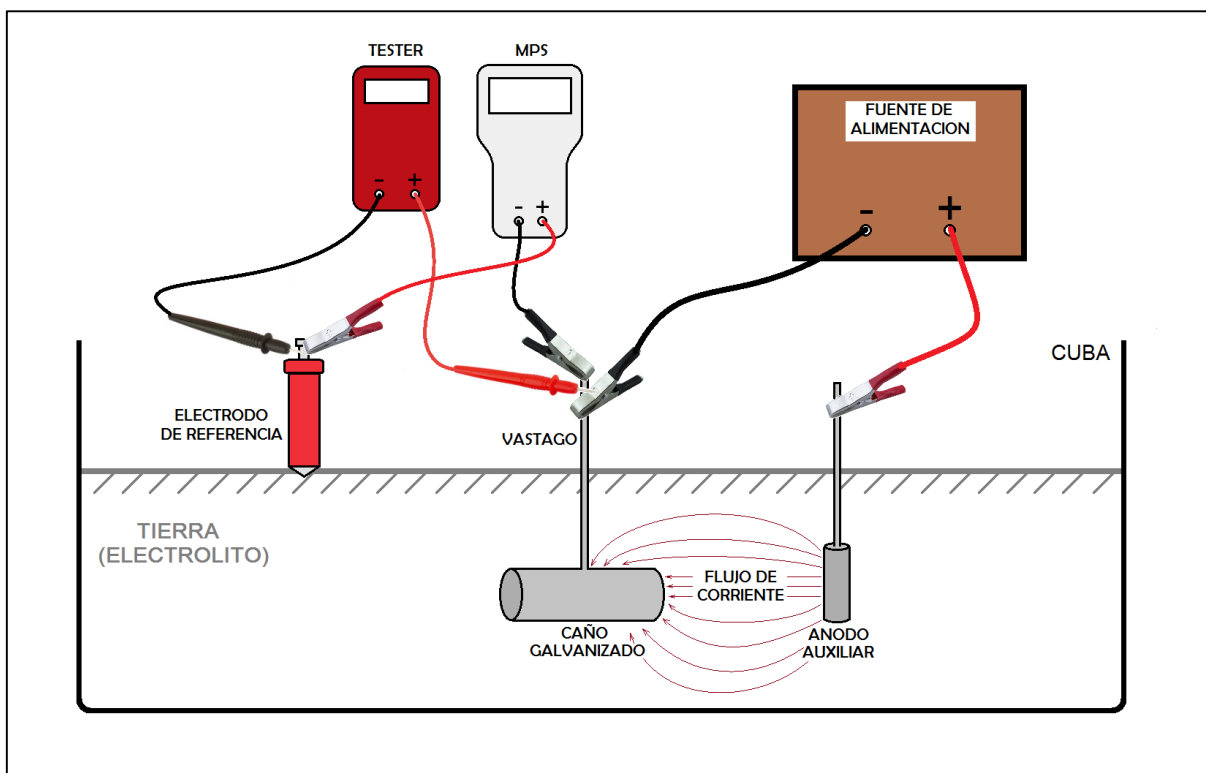


Ilustración 12 – Esquema del conexionado realizado en laboratorio para realizar las mediciones.

Se conectó el borne positivo de la fuente de alimentación al ánodo auxiliar y el negativo al vástago metálico, por lo tanto al caño galvanizado. De este modo, al cerrarse el circuito a través del electrolito (tierra húmeda), estamos logrando obtener una corriente impresa sobre éste, como se explicó anteriormente, logrando así proporcionarle al caño una protección catódica por corriente impresa. Para medir el potencial de protección se conectó el borne negativo del tester al electrodo de referencia y el positivo al caño galvanizado (referencia). Del mismo modo se conectó el MPS, invirtiendo la polaridad de la conexión, debido a que el instrumento lee valores de potencial positivos. Es por este motivo que se observa una diferencia en la polaridad de las mediciones del tester y el MPS en la imagen de la Figura 40.

Cabe aclarar que la tierra se humedeció, incrementando su característica electrolítica, para lograr obtener mejores resultados a la hora de tomar las mediciones. Esto se puede observar en la siguiente imagen, en donde se muestra en detalle el conexionado realizado.



Fig. 39 – Conexión realizada en laboratorio para realizar las mediciones.

El electrodo de referencia que se observa a la izquierda de la Figura 39, de color rojo y blanco, no se utilizó en las mediciones. Como así tampoco el caño galvanizado con vástago soldado que se observa arriba a la izquierda, ni el ánodo auxiliar que se observa abajo en el centro de la imagen.

Se tomaron algunas mediciones con la disposición antes mencionada. En la siguiente imagen se puede observar una de las mediciones tomadas por el MPS, contrastada con la tomada por el tester. Dando los siguientes resultados:

Medición del Tester: 705,4mV

Medición del MPS: 0,772V = 772mV

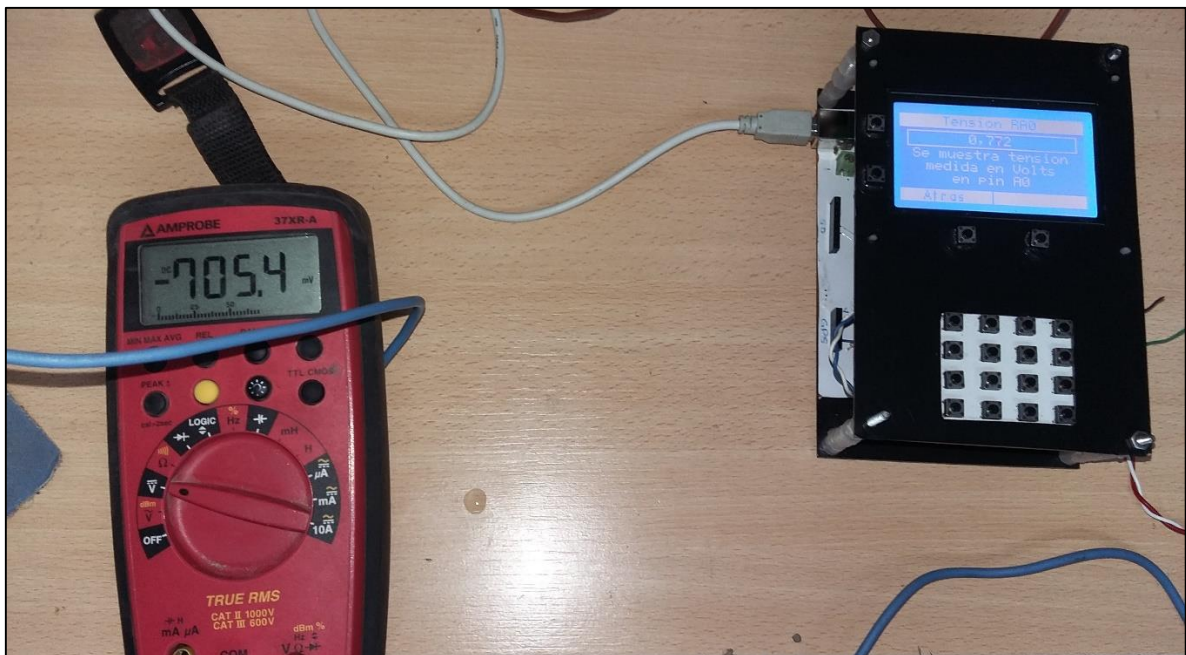


Fig. 40 – Imagen tomada en un momento de medición, en la que se observa la medición del tester y la del Medidor de Potencial Sincronizado (MPS).

Para esta medición, se calculó el error relativo porcentual, de la siguiente manera:

$$ex\% = \frac{Xm - Xv}{Xv} * 100\%$$

$$ex\% = \frac{0.772 - 0.7054}{0.7054} * 100\%$$

$$ex\% = 0.0944 * 100$$

$$\boxed{ex\% = 9.44\%}$$

Siendo Xv el valor medido por el tester, que utilizamos como valor verdadero y Xm el valor tomado por el MPS (valor medido).

Capítulo 5: Conclusiones

Ante la propuesta de la empresa PETROMARK de realizar el medidor de potencial sincronizado en un momento en que las importaciones estaban cerradas y no ingresaba al país instrumental especializado, se propone desarrollar un equipo con tecnología de fácil acceso, concretándose el objetivo general del proyecto.

Los objetivos específicos guiaron el trabajo en la búsqueda de bibliografía, investigación, analizando diversas técnicas de medición del estado de protección catódica. Se realizó el instrumental con asistencia permanente de la empresa PETROMARK en el aporte de elementos que formaron parte de la puesta en marcha del equipo y en la resolución de problemas concretos que se fueron dando en el desarrollo del dispositivo. Logrando desarrollar un equipo de medición de potencial sincronizado de bajo costo (primer objetivo específico planteado).

Las mediciones de protección catódica con el instrumental diseñado en el proyecto se realizaron en laboratorio, no pudiendo realizarlas en campo real porque la tecnología utilizada en el equipo de este proyecto quedo obsoleta ante la tecnología de nuevos equipos importados que ingresaron al país debido a un cambio en las políticas de importación. Dejando como muestras de mediciones las realizadas en laboratorio, sin llevarlo a campo petrolero porque su desarrollo no fue totalmente concluido (segundo objetivo específico planteado). Impidiendo la comparación de resultados con un equipo importado de alta tecnología (tercer objetivo específico planteado).

Luego del tiempo que llevo el desarrollo, nos queda la satisfacción de:

- Comprender que para lograr un objetivo muy ambicioso como fue la construcción de este equipo, fue necesario resolver los problemas emergentes de objetivos parciales que hacían al propósito general. Descubriendo que fue tan importante el desarrollo en el que en cada paso aprendimos y aplicamos lo aprendido como el resultado final, en el que se trabajó para concretar lo programado.
- Haber comprendido que la tecnología utilizada en este proyecto al cabo del tiempo mencionado fue superada por nueva tecnología con la que se lograrían mejores resultados y con un tiempo de desarrollo menor.
- Pudimos lograr desarrollar un dispositivo de bajo costo, en Argentina, en un momento en el que no ingresaban elementos que realizaran estas mediciones.
- Comprender que para grandes proyectos es imprescindible y necesario el trabajo cooperativo.

Proyección:

Considerando los logros obtenidos en las mediciones realizadas en el laboratorio, donde el MPS ha registrado valores inherentes a lo esperado, afianzando nuestros conocimientos en la realización de un equipamiento que fue solicitado por la empresa PETROMARK y de quienes obtuvimos constante ayuda y asesoramiento es que, llegando al final de nuestras conclusiones podemos y debemos dejar asentado que este proyecto puede ampliarse y continuar con los aspectos que mencionaremos a continuación que quedaron pendientes:

- **Tecnología:** debido a que la tecnología utilizada fue superada por la existente en el mercado, es que para el logro de los objetivos de medición y contraste, es necesario el uso de un sistema de control y procesamiento de datos de mejores prestaciones.
- **Gabinete:** estéticamente no es competitivo con los productos que ofrece el mercado, ya que el diseño del MPS llevado a cabo en este proyecto es rustico.
- **Protecciones:** un aspecto que quedo pendiente son protecciones en la entrada de medición adecuadas para trabajar en el campo, contra conexiones inadecuadas a alta tensión, tolerantes a ruidos externos, como así también alta impedancia de entrada.
- **Calibración:** Un aspecto a mejorar puede ser el de agregar la posibilidad de calibración del instrumento de medición, ya que el mismo baja su precisión a través del tiempo, por lo cual se debe considerar que pueda recalibrarse con facilidad con algún elemento patrón.

Bibliografía

- [1] Fundamentos básicos de protección catódica
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgd/hernandez_m_js/capitulo2.pdf*
- [2] “Galvanic Corrosion: A Practical Guide for Engineers” NACE International (2001) Houston Texas 77084.
- [3] A. W. Peabody, En: Peabody’s Control of Pipeline Corrosion, Second Edition, R. L. Bianchetti (Editor) NACE International, Second Edition, Houston, TX, USA, (2001), pp. 6, 134.
- [4] P. Pedferri, Cathodic protection and cathodic prevention, Construction and Building Materials, 10 (1996) 391–402.
- [5] <http://www.monografias.com/trabajos15/corrosion-gas/corrosion-gas.shtml>
- [6] http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S1729-75322014000200004&script=sci_arttext
- [7] http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S1729-75322014000200004&script=sci_arttext
- [8] <https://www.yumpu.com/es/document/view/23236089/proteccion-catodica-con-anodos-galvanicos/6>
- [9] <http://www.ivecor.com.ar/portfolio/recoating-rosario-de-la-frontera-metan/>
- [10] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_6.htm
- [11] https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_5_5.html
- [12] APLICACIÓN DEL METODO DE PROTECCION CATODICA A UNA ADUCCION HIDRAULICA DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS - Ortiz Colmenares Antonio José
- [13] <http://www.protansa.com/sevicios/PROTAN-SA-InspeccionesCIPS-DCVG.pdf>
- [14] <http://www.farnell.com/datasheets/1878006.pdf>
- [15] <https://www.luisllamas.es/arduino-teclado-matricial/>
- [16] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00234a.pdf>
- [17] <http://www.todopic.com.ar/foros/index.php?topic=18911.0>
- [18] <https://www.nationalgeographic.org/photo/triangulation-sized/>
- [19] <http://www.oocities.org/yuraimarojas/pag2.htm>
- [20] https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global

[21] <http://www.selec-ee.com.ar/infotecnica.html>

[22] <http://dtsimexico.com/electrodos.html>

[23] <http://mir.com.ph/samsung-powerbank-18000mah-dual-usb>