

**SISTEMA DE MONITOREO Y REGISTRO DE DATOS EN TIEMPO REAL DE
AZIMUT Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN EN POZOS DESVIADOS Y
VERTICALES**

BORIS JESÚS MOSQUERA CERQUERA

DIRECTOR: ING. RAMIRO PERDOMO RIVERA

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA, 2013**

**SISTEMA DE MONITOREO Y REGISTRO DE DATOS EN TIEMPO REAL DE
AZIMUT Y ANGULO DE INCLINACIÓN EN POZOS DESVIADOS Y
VERTICALES**

BORIS JESUS MOSQUERA CERQUERA

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director:
Ingeniero Ramiro Perdomo Rivera

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA, 2013**

Nota de Aprobación.

El trabajo de grado titulado “**SISTEMA DE MONITOREO Y REGISTRO DE DATOS EN TIEMPO REAL DE AZIMUT Y ANGULO DE INCLINACIÓN EN POZOS DESVIADOS Y VERTICALES**”, presentado por el estudiante BORIS JESÚS MOSQUERA CERQUERA, para optar al título de Ingeniero Electrónico fue revisado por el jurado y calificado como:

Ing. Hector Augusto Valderrama Ipus
Gerente General Applied Oil Tech S.A.S.
Coordinador y Supervisor de Pasantía.

Ing. Ramiro Perdomo Rivera
Director de Pasantía Supervisada. Universidad Sur colombiana.

Ing. Agustín Soto Otálora
Jurado. Universidad Sur colombiana.

Ing. Germán Eduardo Martínez Barreto
Jurado. Universidad Sur colombiana.

A Dios.
A mi madre María Edilma Cerquera.
A mi padre Jesús Mosquera.
A Johanna Alexandra Claros Oyola
A mis hijas Nicol Michell y Emily Johanna.
A mis compañeros de trabajo en Applied Oil Tech S.A.S.

A todos ellos dedico esta obra.

BORIS JESUS MOSQUERA CERQUERA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, el autor de mis días.

A Ingenieros Jairo Hernandez, Héctor Augusto Valderrama, Leonardo Mosquera Rico, Nelson Pastrana, de Applied Oil Tech S.A.S por su apoyo y su guía en el planteamiento, ejecución y presentación de este trabajo de grado.

A Ingeniero Ramiro Perdomo, director de trabajo de grado, por su asesoría en la ejecución del proyecto.

BORIS JESUS MOSQUERA CERQUERA

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-----------|
| INTRODUCCION | 17 |
| I. OBJETIVOS | 18 |
| 1.1 Generales | 18 |
| 1.2 Específicos | 18 |
| II. MODELOS PARA DETERMINAR LA DISTANCIA EN UNA CURVA MAS UTILIZADOS | 19 |
| 2.1 Radio de Curvatura | 19 |
| 2.1.1 Radio de Curvatura en Pozos | 21 |
| 2.1.2 Cálculo del DogLeg por el Método de Radio de Curvatura | 25 |
| 2.2 Método Tangencial | 27 |
| 2.3 Tangencial Equilibrado | 30 |
| 2.4 Angulo Promedio | 32 |
| 2.5 Mínima curvatura | 34 |
| 2.6 Ingeniería Inversa para DeterminarCuál de los Modelos es el Utilizado | 37 |
| III. DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA | 40 |
| 3.1 Diseño de la Herramienta de Fondo | 41 |
| 3.1.1 Diagramas de bloques de la herramienta de fondo | 48 |
| 3.1.2 Acondicionador LPF | 49 |
| 3.1.3 Conversor Análogo/Digital | 50 |
| 3.1.4 Sistema de telemetría | 54 |
| 3.1.5 Decodificador de línea | 55 |
| 3.1.6 Potencia | 56 |

| | |
|---|-----------|
| IV. DISEÑO DE LA INERFAZ DE COMUNICACIÓN | 59 |
| 4.1 Fuente de Baja | 61 |
| 4.2 Fuente de Alta | 62 |
| 4.2 LCD voltaje | 64 |
| 4.3 LCD corriente | 65 |
| 4.4 Acondicionador de Señal (A) | 66 |
| 4.5 Encoder | 68 |
| 4.6 Detector de Fase | 71 |
| 4.7 Conversor I/V, Sensor de peso y Conversor A/D | 72 |
| 4.8 USART | 74 |
| 4.9 Conversor Serial/USB | 83 |
| 4.10 Línea | 84 |
| 4.11. Software del Computador de Usuario | 85 |
| V. RESULTADOS | 91 |
| 5.1 Imágenes del chasis y housing de la herramienta de fondo | 91 |
| 5.2 Imágenes de la instalación de los acelerómetros y main board de la herramienta de fondo | 93 |
| 5.3 Imágenes de la interfaz de comunicación | 94 |
| 5.4 Imágenes del software instalado en el computador del usuario | 96 |
| 5.5 Imagen de pruebas de laboratorio | 101 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| VI. CONCLUSIONES | 105 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 106 |
| ANEXOS | 109 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1: Comparación de los métodos para calcular la distancia entre dos survey | 38 |
| Tabla 2: Tiempos TAD y frecuencia máxima del dispositivo | 53 |
| Tabla 3: Ancho de banda de los sensores | 54 |
| Tabla 4: Ancho de banda escogida para el diseño | 54 |
| Tabla 5: Ráfaga de bits que se desea enviar por el cable a superficie | 55 |
| Tabla 6: Calculo de los baudios | 75 |
| Tabla 7: Registros asociados con la generación de los baudios | 75 |
| Tabla 8: Baudios modo asíncrono con (BRGH = 0) | 76 |
| Tabla 9: Baudios modo asíncrono con (BRGH = 1) | 77 |
| Tabla 10: Registro asociados con la recepción asíncrona | 83 |

LISTAS DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1: Determinación del radio de curvatura | 19 |
| Figura 2: Diagrama con la Geometría planificada del Pozo | 21 |
| Figura 3: Calculo de radio de curvatura en un pozo | 22 |
| Figura 4: Método de radio de curvatura | 25 |
| Figura 5: Método tangencial | 28 |
| Figura 6: Tangencial equilibrado | 30 |
| Figura 7: Angulo promedio | 32 |
| Figura 8: Minina curvatura | 34 |
| Figura 9: Diagrama en bloques del sistema completo | 40 |
| Figura 10: Acelerómetro ADXL150AQC y Gyro XRS300AL | 41 |
| Figura 11: Simulink del acelerómetro ADXL150AQC | 42 |
| Figura 12: Entrada simulada de aceleración | 43 |
| Figura 13: Salida del acelerómetro con entrada de 1g variando sinodalmente | 43 |
| Figura 14: Calculo de la inclinación en el eje x usando Acelerómetro | 44 |
| Figura 15: Calculo de la inclinación en el eje y | 45 |
| Figura 16: Acelerómetros a 90° para obtener lecturas de aceleración en X e Y | 46 |
| Figura 17: Acelerómetro inclinado a 0° | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 18: Acelerómetro girado a 30° | 47 |
| Figura 19: Diagrama en bloques de la herramienta de fondo | 48 |
| Figura 20: Acondicionador LPF | 49 |
| Figura 21: Respuesta del filtro pasa bajos | 50 |
| Figura 22: Modelo de entrada analógica | 52 |
| Figura 23: Salida del PIC y entrada al circuito que introduce los bits al cable | 56 |
| Figura 24: Circuito que supe de voltajes a la herramienta | 57 |
| Figura 25: Simulación en Proteus del circuito de potencia | 58 |
| Figura 26: Oscilograma de la simulación del circuito de potencia | 58 |
| Figura 27: Diagrama en bloques de la interfaz de comunicación | 59 |
| Figura 28: Diagrama electrónico de la fuente de baja. | 61 |
| Figura 29: Diagrama electrónico del circuito limitador de corriente | 62 |
| Figura 30: Fuente de alta completa | 64 |
| Figura 31: Voltímetro digital de panel | 65 |
| Figura 32: Amperímetro digital de panel | 65 |
| Figura 33: Acondicionador de señal | 66 |
| Figura 34: 60 voltios más señal y señal acondicionada | 67 |
| Figura 35: Encoder utilizado Modelo XH20DB-37-SS-200 | 68 |
| Figura 36: Componentes básicos de un Encoder óptico incremental | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 37: Salidas generadas por el encoder incremental óptico | 70 |
| Figura 38: Señales A y B para determinar la dirección de la herramienta | 71 |
| Figura 39: Camión de registro de electric line | 73 |
| Figura 40: Conversor I/V | 73 |
| Figura 41: Distribución de los bits en el módulo USART | 74 |
| Figura 42: Diagrama de bloques del transmisor USART | 78 |
| Figura 43: Transmisión asíncrona | 80 |
| Figura 44: diagrama de bloques del receptor USART | 81 |
| Figura 45: Recepción asíncrona | 82 |
| Figura 46: Conversor USART a USB | 84 |
| Figura 47: Carrete de cable 7/32 y 9/32 de unidad de registro | 85 |
| Figura 48: Chasis de la herramienta de fondo | 91 |
| Figura 49: Housing de la herramienta de fondo | 92 |
| Figura 50: Detalle de los canales para O-ring de presión | 92 |
| Figura 51: A. Detalle del conector eléctrico macho B. Detalle del conector eléctrico hembra | 92 |
| Figura 52: Acople del housing con el chasis de la herramienta de fondo | 93 |
| Figura 53: Ubicación de los Acelerómetros | 93 |
| Figura 54: Main board de la herramienta de fondo | 93 |

| | |
|--|-----|
| Figura 55: Conexión de la sensórica con la main board herramienta de fondo | 94 |
| Figura 56: Ensamble de la electrónica y chasis de la herramienta de fondo | 94 |
| Figura 57: Parte frontal de la interfaz de adquisición | 95 |
| Figura 58: Parte frontal del sistema de adquisición WARRIOR | 95 |
| Figura 59: vista posterior de la interfaz de comunicación | 95 |
| Figura 60: Vista interna del sistema de la interfaz de comunicación | 96 |
| Figura 61: Pestaña de Config | 97 |
| Figura 62: Pestaña de Calibrations | 98 |
| Figura 63: Pestaña General Information | 99 |
| Figura 64: Pestaña Run acquire | 99 |
| Figura 65: Pestaña Procces data | 100 |
| Figura 66: Pestaña de Draw trayectory | 100 |
| Figura 67: Pestaña Options | 101 |
| Figura 68: Pestaña Report | 101 |
| Figura 69: Prueba de la fuente de la interfaz de comunicación | 102 |
| Figura 70: Conexión total de herramienta de fondo, Interfaz de comunicación y computador del usuario | 102 |
| Figura 71: Oscilograma de la salida de la herramienta de fondo | 103 |
| Figura 72: Oscilograma de la señal de salida del microprocesador | 103 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| ANEXO A. Teoría de los Acelerómetros | 112 |
| ANEXO B. El Giroscopio | 118 |
| ANEXO C. Diagrama Electrónico de la Herramienta de Fondo | 125 |
| ANEXO D. Diagrama Electrónico del Sistema de Adquisición de Datos | 126 |
| ANEXO E. Registro direccional tomado con la herramienta diseñada | 127 |

RESUMEN

En este trabajo de grado se plasmó las características, principio de funcionamiento, clases y aplicaciones de acelerómetros y giróscopos que se utilizan a nivel comercial y en particular los empleados en la industria del petróleo. Fueron tema de un concienzudo estudio los sistemas integrales que nos proporcionan aceleración y giro, modelos matemáticos como el modelo de radio de curvatura, balance tangencial, promedio tangencial y mínima curvatura; enfocados en lograr el monitoreo y registro en tiempo real de azimut y ángulo de inclinación de pozos desviados y horizontales.

Se incluye también el análisis de datos obtenidos con sistemas cuyo funcionamiento ha sido comprobado por experiencias anteriores, para determinar cuál de los modelos matemáticos mencionados fue el utilizado y así definir el modelo que se empleará para desarrollar su aplicación en este trabajo.

Además de diseñar e implementar la herramienta de fondo, consistente en el sistema de acelerómetro con el cual se determina la inclinación, un giróscopo que nos marca el azimut y un sensor de temperatura, también se desarrolló el dispositivo de superficie, el cual mide la tensión que experimenta el cable a través de un sensor de peso y un encoder que indica la velocidad y profundidad en la que se encuentra la herramienta. Este dispositivo de superficie sirve de interface entre la herramienta de fondo y el computador del usuario.

Se tuvo en cuenta la telemetría ya que se debe establecer la correcta comunicación entre la herramienta de fondo y el sistema de adquisición o de interface teniendo en cuenta las limitaciones del medio de transmisión (Cable eléctrico mono conductor).

Por último se crea el software que permite el uso amigable de la aplicación en tiempo real y facilita el manejo del sistema total en forma de pestañas las cuales permite configurar, calibrar, introducir información general del trabajo a realizar, arranque de adquisición, procesamiento de data, dibujo de la trayectoria, y una facilidad que permite el desarrollo del informe final que el usuario de la herramienta presenta al cliente.

Palabras claves: acelerómetro, giróscopo, ángulo de inclinación, azimut, radio de curvatura, balance tangencial, promedio tangencial, mínima curvatura.

ABSTRACT

This work was shaped grade features, principle of operation, types and applications of accelerometers and gyroscopes that are used commercially and in particular those used in the oil industry.

Were the subject of a thorough study whole systems that we provide acceleration and rotation, mathematical models as the radius of curvature model, balance tangential, tangential average and minimum curvature, focused on achieving and monitoring real-time recording and azimuth angle inclination of deviated and horizontal wells.

It also includes analysis of data obtained with systems whose performance has been proven by past experience to determine which of the above was the mathematical models used and define the model that will be used to develop your application in this paper.

In addition to design and implement the down hole tool, consisting of the accelerometer system which determines the inclination, that marks a gyro azimuth and a temperature sensor was also developed surface device, which measures the tension experiencing the cable through a weight sensor and an encoder which indicates the speed and depth at which the tool is located. This device is the interface surface between the down hole tool and the user's computer.

Consideration was given to the telemetry as it should establish proper communication between the down hole tool and the acquisition system or interface given the limitations of the transmission medium (electrical cable mono conductor). Finally you create the software that allows the user friendliness of the application in real time and facilitates the management of the overall system as tabs which allows you to configure, calibrate, enter general information of the research, starting acquisition data processing drawing of the path, and a facility that allows the development of the final report that the user of the tool presents the client.

Keywords: accelerometer, gyroscope, tilt angle, azimuth, radius of curvature, balance tangential, tangential average, minimum curvature.

INTRODUCCION

Este trabajo de grado se refiere al diseño e implementación de un sistema para establecer en tiempo real el azimut y ángulo de inclinación en pozos desviados y verticales para definir el perfil de construcción de pozos ya perforados y comprobar la verticalidad, con esta información se analiza a que distancia se puede construir un nuevo pozo para no estropear así el pozo anterior ya existente.

Se tuvo en cuenta los datos registrados con herramientas conocidas y acreditadas en su funcionamiento, para deducir cuál de los modelos matemáticos utilizaban para calcular la distancia entre dos puntos (surveys) sea el modelo de radio de curvatura, método tangencial, tangencial equilibrado, ángulo promedio y por último mínima curvatura, resultando éste el más aproximado al comparar los datos de las herramientas de fabricación americana con los datos adquiridos inicialmente con la herramienta aquí diseñada.

Posteriormente, se procede a detallar los componentes del sistema pensado en tres grandes bloques definidos como herramienta de fondo, interfaz de comunicación y el software instalado en el computador del usuario.

La herramienta de fondo es el dispositivo que se envía con la ayuda de un cable eléctrico al fondo del pozo a analizar; ella recibe los datos tomados por la sensórica consistente en sensores de aceleración, sensores de giro y temperatura, y luego a través de ese mismo cable remite estos datos a superficie hasta la interfaz de comunicación.

Como su nombre lo indica, la interfaz de comunicación realiza la comunicación entre la herramienta de fondo y el computador del usuario el cual está ubicado en la superficie, dentro del camión de registro.

Esta información es almacenada en un archivo .txt en el computador del usuario y procesada aplicando el método de mínima curvatura y al final con estos valores se procede a graficar la trayectoria del pozo según las coordenadas Oeste – Este (W-E), Norte - Sur (N-S) y la vista de planta que combina las dos coordenadas (W-E y N-S). Esta gráfica es la que el interesa al cliente porque muestra la dirección real del pozo y así tomar decisión para futuras perforaciones de nuevos pozos.

I. OBJETIVOS

1.1 General

Desarrollar e implementar un sistema de monitoreo y registro de datos en tiempo real de azimut y ángulo de desviación en pozos horizontales

1.2 Específicos

- Adquirir destrezas en la operación de toma de registros de azimut y ángulo de inclinación de pozos petroleros.
- Conocer y analizar la naturaleza de las señales eléctricas producidas por los sensores MEMS (Sistemas Micro Electromecánicos) que utiliza la herramienta.
- Diseñar un hardware que acondicione y procese las señales eléctricas provenientes de sensores tipo MEMS (Sistemas Micro Electromecánicos)
- Diseñar la tarjeta de adquisición para Interpretar en forma sencilla las señales eléctricas en pantalla.
- Diseñar el Hardware necesario para utilizar la herramienta en tiempo real

II. MODELOS PARA DETERMINAR LA DISTANCIA EN CURVA MÁS UTILIZADO

Se han desarrollado diferentes modelos que permiten calcular la distancia de una curva, teniendo desarrollo evolutivo desde que se creó el primero, Radio de curvatura, posteriormente, Tangencial, tangencial equilibrado, ángulo promedio y por último y siendo el más utilizado por su exactitud, el modelo de mínima curvatura.

Para determinar cuál de estos modelos es el que utiliza la herramienta Gyro de manufactura americana, se desarrolló un programa Matlab con los modelos y este resultado se comparó con una data obtenida por un registro Gyro conocido.

2.1 Radio de curvatura

Así como explica Ricardo Cabrera en su escrito Cinemática Escalar [7]:

Suponiéndose que alguien se desplaza en un auto por una ruta en la llanura, pero la ruta tiene una curva que vista de arriba tiene forma de parábola. Cuando se ingresa a la curva (por una de las ramas de la parábola) gira muy poco el volante, pero a medida que sigue avanzando la curva se cierra más y más. En el vértice de la parábola o giro del volante (el torcimiento o desvío de las ruedas) es máximo, y a partir de ahí se va enderezando suavemente.

El radio de curvatura es el concepto que describe físicamente este relato, según el siguiente esquema, representado en la figura 1, se observa en rojo, la trayectoria parabólica de un tiro oblicuo y las velocidades, en verde, siempre son tangentes a la trayectoria. En el mismo punto de tangencia se puede apoyar una circunferencia oscultriz, que indica cuán curvada es la trayectoria en ese lugar.

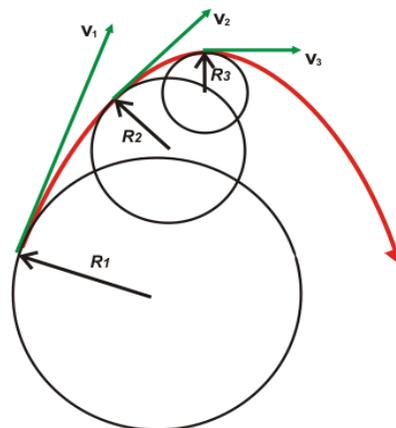


Figura 1: Determinación del radio de curvatura. Tomado de pág 1 [7]

Cuanto mayor es el giro, cuanto más girado esté el volante, menor es el radio de curvatura, menor es la circunferencia hipotética que tiene una curvatura igual a esa en la que se está girando en ese instante.

Por el contrario, cuanto menor –o más suave– es la curvatura de la ruta, mayor es el radio de giro, o sea, mayor es la circunferencia hipotética que tiene una curvatura igual a ésta en la que se está girando en ese momento.

A esa circunferencia hipotética se la llama circunferencia osculatriz, cuando un móvil está doblando, sea sobre la curva que sea, y sea sobre la trayectoria que sea, siempre se puede pensar que está doblando sobre una circunferencia que tiene igual curvatura que la trayectoria en ese momento. Esa circunferencia tiene un radio llamado radio de curvatura, y sirve para caracterizar la curva en ese punto.

Para el cálculo nos remitimos al movimiento circular. La condición necesaria para estar en un movimiento circular es poseer una aceleración centrípeta (que asegura que la dirección de la velocidad cambie, o sea, que podamos doblar). Tenemos que la aceleración centrípeta está dada por:

$$ac = \frac{v^2}{R} \quad Ec. 2.1$$

Esta expresión permite hallar el radio de la circunferencia osculatriz, es decir, independientemente de cuál sea la trayectoria en particular.

$$R = \frac{v^2}{ac} \quad Ec. 2.2$$

Para hacer el cálculo se debe conocer la velocidad tangencial y la aceleración centrípeta.

El centro de curvatura está definido por un punto en el espacio y el radio de curvatura es la distancia que hay entre el centro de curvatura y cada punto de la trayectoria o de la curva.

Como hacer el cálculo, depende de con que datos se cuentan:

Si la curva es una circunferencia sería:

$$\text{Arco de curvatura} = \text{Angulo barrido} * R \quad Ec. 2.3$$

El ángulo barrido por el fesor o vector giratorio debe estar expresado en Pi radianes

2.1.1 Radio de Curvatura en Pozos

En la red se encuentra varios ejemplos donde se utiliza el método de Radio de Curvatura para determinar la tasa de construcción en grados /pie, como es el caso del *PerfoBlogger* < <http://achjij.blogspot.com/2011/01/ejemplo-de-calculo-de-perforacion.html>>:

El Diseñador de Pozos tiene que planificar un punto de Partida (KOP= Kick off Point, en Inglés) para el Pozo, incluyéndole una sección de construcción de ángulo para iniciar el desvío del pozo, bien sea para evitar domo salino o para alguna otra finalidad de la perforación Direccional. Se pretende en este caso de ejemplo, lograr una sección curva de 1500 ft de desplazamiento horizontal programada a una TVD objetivo de 10,000 ft. Con el siguiente ejemplo se calcula la Profundidad Medida (MD) y la Tasa de Construcción de ángulo.

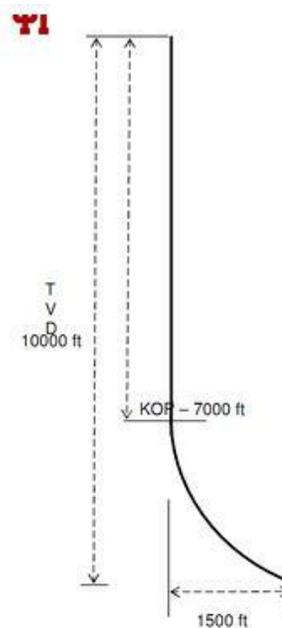


Figura 2: Diagrama con la Geometría planificada del Pozo. *Tomado archivos y publicaciones 1 septiembre 2011, PerfoBlogger [8]*

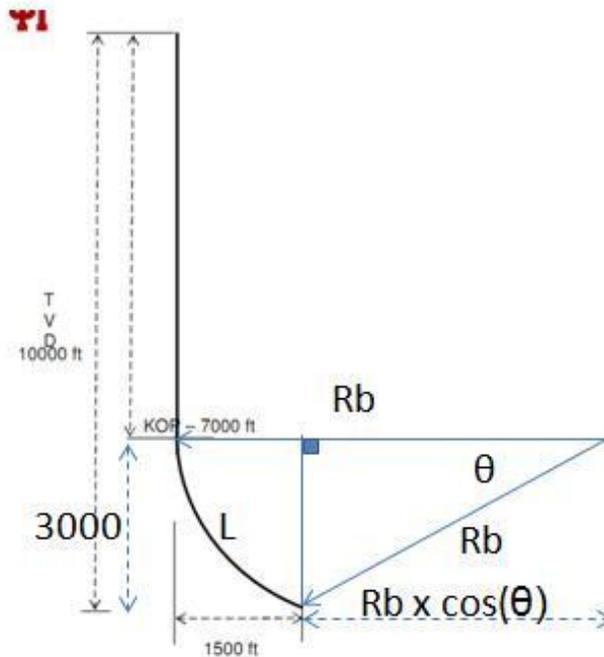


Figura 3: Calculo de radio de curvatura en un pozo. Tomado archivos y publicaciones 1 septiembre 2011, PerfoBlogger [8]

Con las dos siguientes formulas se puede calcular: Radio de Curvatura (Rb) y la Longitud de Hoyo (L):

$$L = \left(\frac{\pi}{180}\right) * Rb * \theta \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$Rb = \left(\frac{180}{\pi}\right) * \left(\frac{1}{q}\right)$$

Dónde:

Rb = radio de curvatura en pies (ft)

q = Tasa de Construcción en grados/pie

theta = Angulo de construcción

Datos:

Total TVD = 10000 ft

TVD en Seccion de construccion = 10000 - 7000 = 3000 ft

Desplazamiento Horizontal = 1500 ft

Del Diagrama podemos observar:

$$Rb = 1500 + Rb * \cos \theta$$

$$1500 = Rb * (1 - \cos \theta) \quad \text{Ec. 2.5}$$

Usando Relaciones Trigonométricas tenemos que:

$$3000 = Rb * \sin \theta \quad \text{Ec. 2.6}$$

Si dividimos $\text{Ec. 2.5} / \text{Ec. 2.4}$, se tiene que:

$$\frac{1500}{3000} = \frac{Rb * (1 - \cos \theta)}{Rb * \sin \theta} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Elevando la Ec. 2.5 al cuadrado:

$$\frac{\sin(\theta)^2}{4} = 1 - 2 \cos(\theta) + \cos(\theta)^2 \quad \text{Ec. 2.8}$$

Organizando la Ec. 2.7 se obtiene que:

$$\sin(\theta)^2 = 4 - 8 \cos(\theta) + 4 \cos(\theta)^2 \quad \text{Ec. 2.9}$$

Según la Relación Trigonométrica:

$$\sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 = 1$$

Por lo tanto se puede cambiar la Ec. 2.8 de la siguiente forma:

$$1 - \cos(\theta)^2 = 4 - 8 \cos(\theta) + 4 \cos(\theta)^2$$

Obteniendo la ecuación de abajo:

$$5 \cos(\theta)^2 - 8 \cos(\theta) + 3 = 0$$

Usando una relación polinómica organizamos la ecuación de la siguiente forma:

$$(5 \cos(\theta) - 3)(\cos(\theta) - 1) = 0$$

Usando estas ecuaciones se pueden obtener dos posibilidades:

$$\cos(\theta) = \frac{3}{5} \quad \text{ó} \quad \cos(\theta) = 1$$

Por lo que se necesita chequear cual sería la respuesta correcta:

$$\cos(\theta) = 1 \quad \text{No es real porque } \theta = 0 \text{ grados}$$

Por lo tanto, $\cos(\theta) = \frac{3}{5}$ es la respuesta correcta para este caso.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{3}{5}\right) = 53.13 \text{ deg}$$

Usando la Ec. 2.5, se puede obtener Rb :

$$\begin{aligned} 1500 &= Rb * (1 - \cos \theta) \\ 1500 &= Rb * (1 - \cos(53.13)) \\ 1500 &= Rb * \left(1 - \frac{3}{5}\right) \\ Rb &= 3750 \text{ ft} \end{aligned}$$

Ahora se puede obtener la longitud de la sección de construcción con la Ec. 2.4

$$\begin{aligned} L &= \left(\frac{\pi}{180}\right) * Rb * \theta \\ L &= \left(\frac{\pi}{180}\right) * 3750 * 53.13 = 3477.35 \text{ ft} \end{aligned}$$

La Profundidad Medida (MD) total desde el taladro hasta el final de la sección de construcción es:

$$MD \text{ total} = 7000' + 3477.35' = 10477.35 \text{ ft}$$

Ahora determinaremos la Tasa de Construcción, si:

$$Rb = \left(\frac{180}{\pi}\right) * \left(\frac{1}{q}\right)$$

Entonces:

$$3750 = \left(\frac{180}{\pi}\right) * \left(\frac{1}{q}\right)$$

Despejando q se tiene que:

$$q = \left(\frac{180}{3.14 * 3750} \right)$$

Para reportar en $grados/100'$, se multiplica el resultado por 100 pies, obteniéndose el siguiente valor:

$$q = 1.65 \text{ } \frac{grados}{100 \text{ pies}}$$

$$q = 1.65 \text{ } \frac{\circ}{100'} \quad \text{Tasa de Incremento de Angulo}$$

2.1.2 Cálculo del DogLeg por el Método de Radio de Curvatura

Como lo expone *drillingformulas.com* [10].

La severidad de Pata de Perro (en inglés: DogLeg Severity DLS) es una estimación normalmente descrita en grados por cada 100 pies, indicando la variación de la curvatura general del hoyo entre dos estaciones de surveys direccionales consecutivas. De acuerdo con una planificación de perforación de pozo, la severidad de pata de perro es sinónimo de la tasa de Giro y/o Construcción de la curva del pozo. La *Ec. 2.10* permite calcular la Severidad de Pata de Perro en Grados/100ft, basados en el Método del Radio de Curvatura.

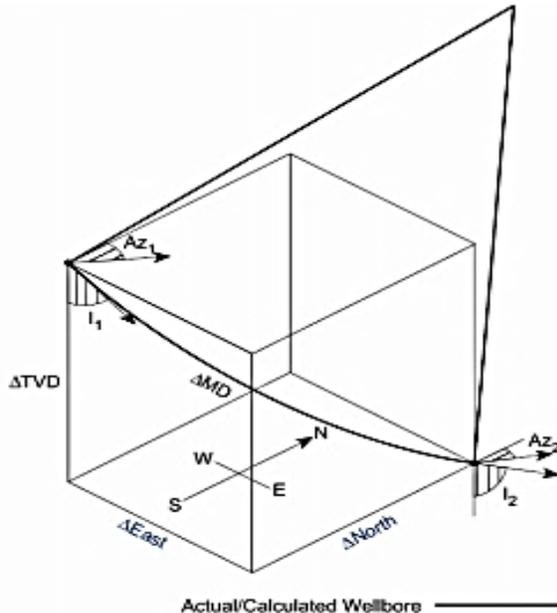


Figura 4: Método de radio de curvatura. Tomado archivos y publicaciones 1 septiembre 2011, *PerfoBlogger* [8]

Severidad de PATA DE PERRO

$$(DLS) = \{\cos^{-1}[(\cos l1 * \cos l2) + (\sin l1 * \sin l2) * \cos(Az2 - Az1)]\} * (100/MD) \quad Ec. 2.10$$

Dónde:

MD = Profundidad medida entre dos surveys, expresada en pies.

l1 = Inclinacion(angulo)del surveys superior, en Grados.

l2 = Inclinacion(angulo)del surveys inferior, en Grados.

Az1 = Azimuth o direccion del Survey superior

Az2 = Azimuth o direccion del Survey inferior

El siguiente es un ejemplo de cálculo del Dogleg basado en el método de radio de curvatura.

Survey 1

Profundidad = 7500 ft
Inclinacion = 45 grados (l1)
Azimuth = 130 grados (Az1)

Survey 2

Profundidad = 7595 ft
Inclinacion = 52 grados (l2)
Azimuth = 139 grados (Az2)

Severidad de PATA DE PERRO

$$(DLS) = \{\cos^{-1}[(\cos 45 * \cos 52) + (\sin 45 * \sin 52) * \cos(139 - 130)]\} * (100/95)$$
$$(DLS) = 10,22 \text{ Grados} / 100 \text{ pies}$$

Por medio de la ayuda de Matlab, determinamos DLS así:

```
disp('DATOS SURVEY 1')
D1= input('profundidad D1: ');
l1 = input('inclinacion l1: ');
l1=pi*(l1)/180;
Az1 = input('azimut Az1: ');
Az1=pi*(Az1/180);
```

```

disp('DATOS SURVEY 2')
D2 = input('profundidad D2: ');
l2 = input('inclinacion l2: ');
l2=pi*(l2)/180;
Az2 = input('azimut Az2: ');
Az2=pi*(Az2)/180;

DLS= (100/(abs(D1-
D2))) *acos((cos(l1)*cos(l2))+(sin(l1)*sin(l2))*cos(Az2-Az1));
DLS=rad2deg(DLS)

```

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
DATOS SURVEY 1
profundidad D1: 7500
inclinacion l1: 45
azimut Az1: 130
DATOS SURVEY 2
profundidad D2: 7595
inclinacion l2: 52
azimut Az2: 139

```

```

DLS = 10.2168

```

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////

```

2.2 Método Tangencial diseño de trayectorias de perforación de pozos [11]

El método tangencial fue el primer método utilizado por la industria petrolera mundial, sus cálculos están basados en ángulos de inclinación y dirección correspondientes a dos puntos contiguos (S1 y S2) en la trayectoria. La distancia medida entre dos puntos del pozo (MD) es tomada como una línea recta, se asume que la línea tiene el mismo ángulo de desviación y dirección que el punto inferior (S2). Para dos estaciones de monitoreo, S1 y S2, donde la profundidad medida, D1 y D2, la inclinación l1 y l2 y el azimut Az1 y Az2 son conocidos, el norte-sur, este-oeste y el TVD pueden ser calculadas en S2. Los errores con este método pueden ser significativos y de ahí su imprecisión.

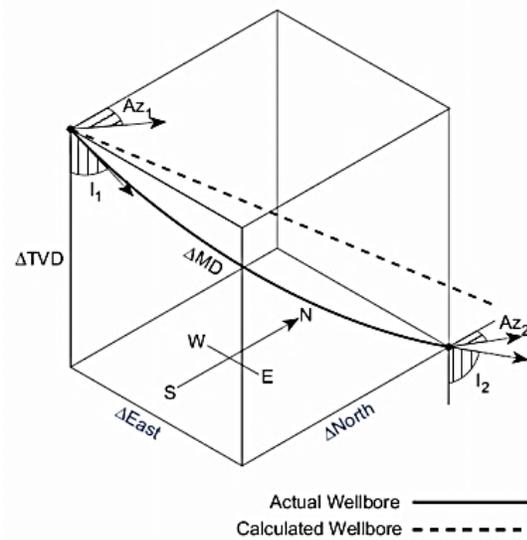


Figura 5: Método tangencial. Tomado <http://www.drillingformulas.com/tangential-method-calculation/> [11]

Las ecuaciones para el cálculo de coordenadas con el método tangencial son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{North} &= MD * \sin(I_2) * \cos(A_{z2}) \\ \text{East} &= MD * \sin(I_2) * \sin(A_{z2}) \\ \text{TVD} &= MD * \cos(I_2) \end{aligned}$$

MD = Profundidad medida entre dos surveys, expresada en pies.

I2 = Inclinacion(angulo)del surveys inferior, en Grados.

Az2 = Azimuth o direccion del Survey inferior

El siguiente es un ejemplo del cálculo de coordenadas por el método tangencial:

Survey 1

Profundidad = 3500 ft(D1)

Inclinacion = 15 grados (I1)

Azimuth = 20 grados (Az1)

Survey 2

Profundidad = 3600 ft (D2)

Inclinacion = 25 grados (I2)

Azimuth = 45 grados (Az2)

$$\begin{aligned}
MD &= D2 - D1 = 3600 - 3500 = 100 \\
North &= 100 * \sin(25) * \cos(45) \\
East &= 100 * \sin(25) * \sin(45) \\
TVD &= 100 * \cos(25) \\
North &= 29.89 \text{ ft} \\
East &= 29.88 \text{ ft} \\
TVD &= 90.63 \text{ ft}
\end{aligned}$$

Por medio de la ayuda de Matlab, se calculan los anteriores datos, así:

```

disp('DATOS SURVEY 1')
D1= input('profundidad D1: ');
l1 = input('inclinacion l1: ');
l1=pi*(l1)/180;
Az1 = input('azimut Az1: ');
Az1=pi*(Az1/180);

disp('DATOS SURVEY 2')
D2 = input('profundidad D2: ');
l2 = input('inclinacion l2: ');
l2=pi*(l2)/180;
Az2 = input('azimut Az2: ');
Az2=pi*(Az2)/180;
MD=abs(D1-D2)

North=MD*sin(l2)*cos(Az2)
East=MD*sin(l2)*sin(Az2)
TVD= MD*cos(l2)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
DATOS SURVEY 1
profundidad D1: 3500
inclinacion l1: 15
azimut Az1: 20
DATOS SURVEY 2
profundidad D2: 3600
inclinacion l2: 25
azimut Az2: 45

MD =    100
North =    29.8836
East =    29.8836
TVD =    90.6308
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

2.3 Tangencial Equilibrado [12]

Este método de cálculo presentado por <http://www.drillingformulas.com/balanced-tangential-method-calculation/> trata la mitad de la distancia medida ($MD / 2$) como tangente a I_1 y Az_1 y el resto de la distancia medida ($MD / 2$) como tangente a I_2 y Az_2 .

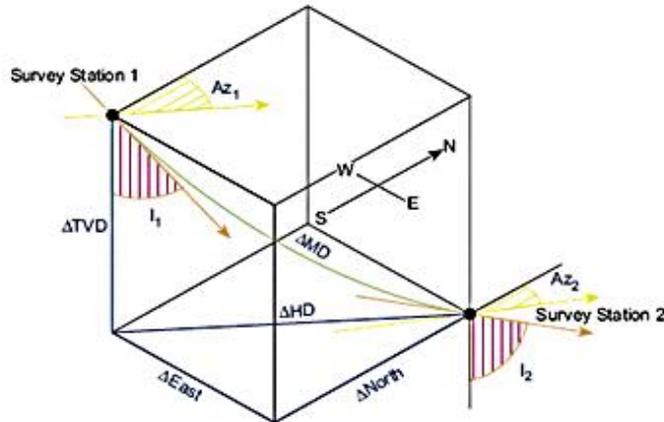


Figura 6: Tangencial equilibrado. Tomado <http://www.drillingformulas.com/balanced-tangential-method-calculation/>

Las fórmulas para el método de tangencial equilibrado son las siguientes:

$$\begin{aligned} North &= MD/2 * (\sin(I_1) * \cos(A_{c1}) + \sin(I_2) * \cos(A_{c2})) \\ East &= MD/2 * (\sin(I_1) * \sin(A_{c1}) + \sin(I_2) * \sin(A_{c2})) \\ TVD &= MD/2 * (\cos(I_1) + \cos(I_2)) \end{aligned}$$

MD = Profundidad medida entre dos surveys, expresada en pies.

I_1 = Inclinacion(angulo)del surveys superior, en Grados.

I_2 = Inclinacion(angulo)del surveys inferior, en Grados.

Az_1 = Azimuth o direccion del Survey superior

Az_2 = Azimuth o direccion del Survey inferior

El siguiente es un ejemplo del método tangencial equilibrado:

Survey 1

Profundidad = 3500 ft(D1)

Inclinacion = 15 grados (I1)

Azimuth = 20 grados (Az1)

Survey 2

Profundidad = 3600 ft (D2)

Inclinacion = 25 grados (l2)

Azimuth = 45 grados (Az2)

$$MD = D2 - D1 = 3600 - 3500 = 100$$

$$North = 100/2 * (\sin(15) * \cos(20) + \sin(25) * \cos(45))$$

$$East = 100/2 * (\sin(15) * \sin(20) + \sin(25) * \sin(45))$$

$$TVD = 100/2 * (\cos(15) + \cos(25))$$

$$North = 27.1 \text{ ft}$$

$$East = 19.37 \text{ ft}$$

$$TVD = 93.61 \text{ ft}$$

Por medio de la ayuda de Matlab calculamos los anteriores datos así:

```
disp('DATOS SURVEY 1')
D1= input('profundidad D1: ');
l1 = input('inclinacion l1: ');
l1=pi*(l1)/180;
Az1 = input('azimut Az1: ');
Az1=pi*(Az1/180);

disp('DATOS SURVEY 2')
D2 = input('profundidad D2: ');
l2 = input('inclinacion l2: ');
l2=pi*(l2)/180;
Az2 = input('azimut Az2: ');
Az2=pi*(Az2)/180;

MD=abs(D1-D2)

North=(MD/2)*(sin(l1)*cos(Az1)+sin(l2)*cos(Az2))
East=(MD/2)*(sin(l1)*sin(Az1)+sin(l2)*sin(Az2))
TVD= (MD/2)*(cos(l1)+cos(l2))
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
DATOS SURVEY 1
profundidad D1: 3500
inclinacion l1: 15
azimut Az1: 20
DATOS SURVEY 2
profundidad D2: 3600
inclinacion l2: 25
azimut Az2: 45
MD = 100
```


Survey 2

$$\text{Azimuth} = 20 \text{ grados (Az1)}$$

$$\text{Profundidad} = 3600 \text{ ft (D2)}$$

$$\text{Inclinacion} = 25 \text{ grados (l2)}$$

$$\text{Azimuth} = 45 \text{ grados (Az2)}$$

$$MD = D2 - D1 = 3600 - 3500 = 100$$

$$\text{North} = 100 * \left(\sin\left(\frac{15 + 25}{2}\right) + \cos\left(\frac{20 + 45}{2}\right) \right)$$

$$\text{East} = 100 * \left(\sin\left(\frac{15 + 25}{2}\right) + \sin\left(\frac{20 + 45}{2}\right) \right)$$

$$\text{TVD} = 100 * \cos\left(\frac{15 + 25}{2}\right)$$

$$\text{North} = 118.54 \text{ ft}$$

$$\text{East} = 87.93 \text{ ft}$$

$$\text{TVD} = 93.97 \text{ ft}$$

Con la ayuda de Matlab podemos obtener los anteriores datos así:

```
disp('DATOS SURVEY 1')
D1= input('profundidad D1: ');
l1 = input('inclinacion l1: ');
l1=pi*l1/180;
Az1 = input('azimut Az1: ');
Az1=pi*(Az1/180);

disp('DATOS SURVEY 2')
D2 = input('profundidad D2: ');
l2 = input('inclinacion l2: ');
l2=pi*l2/180;
Az2 = input('azimut Az2: ');
Az2=pi*Az2/180;

MD=abs(D1-D2)

North=MD*(sin((l1+l2)/2)+cos((Az1+Az2)/2))
East=MD*(sin((l1+l2)/2)+sin((Az1+Az2)/2))
TVD= MD*cos((l1+l2)/2)
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
DATOS SURVEY 1
profundidad D1: 3500
inclinacion l1: 15
azimut Az1: 20
DATOS SURVEY 2
profundidad D2: 3600
inclinacion l2: 25
```


b.2) el factor de relación entre la sección recta y la sección curva ($RF(admin)$).

$$RF = \left(\frac{2}{\beta}\right) * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad Ec. 2.12$$

b.3) el desplazamiento coordinado Norte/ Sur al final del segmento.

$$North = \frac{MD}{2} * (\sin(I_1) * \cos(A_{z1}) + \sin(I_2) * \cos(A_{z2})) * RF \quad Ec. 2.13$$

b.4) el desplazamiento coordinado Este/Oeste al final del segmento con la ecuación 2.14

$$East = \frac{MD}{2} * (\sin(I_1) * \sin(A_{z1}) + \sin(I_2) * \sin(A_{z2})) * RF \quad Ec. 2.14$$

b.5) la profundidad vertical del segmento, con la siguiente expresión:

$$TVD = \frac{MD}{2} * (\cos(I_1) + \cos(I_2)) * RF \quad Ec. 2.15$$

Dónde:

β = ángulo máximo de desviación del segmento (°)

MD = Profundidad medida entre dos surveys, expresada en pies.

$l1$ = Inclinación(ángulo)del surveys superior, en Grados.

$l2$ = Inclinación(ángulo)del surveys inferior, en Grados.

$Az1$ = Azimuth o dirección del Survey superior

$Az2$ = Azimuth o dirección del Survey inferior

El siguiente es un ejemplo del método de mínima curvatura:

Survey 1

Profundidad = 3500 ft(D1)

Inclinación = 15 grados (l1)

Azimuth = 20 grados (Az1)

Survey 2

Profundidad = 3600 ft (D2)

Inclinación = 25 grados (l2)

Azimuth = 45 grados (Az2)

$$MD = D2 - D1 = 3600 - 3500 = 100 \text{ ft}$$

$$\beta = \cos^{-1} (\cos(25 - 15) - (\sin(15) * \sin(25) * (1 - \cos(45 - 20))))$$

$$\beta = 0.22602 \text{ rad} = 12.95 \text{ grados}$$

$$RF = \left(\frac{2}{0.22605}\right) * \tan\left(\frac{12.95}{2}\right)$$

$$RF = 1.00408$$

$$North = \frac{100}{2} * (\sin(15) * \cos(20) + \sin(25) * \cos(45)) * 1.00408$$

$$East = \frac{100}{2} * (\sin(15) * \sin(20) + \sin(25) * \sin(45)) * 1.00408$$

$$TVD = \frac{100}{2} * (\cos(15) + \cos(25)) * 1.00408$$

$$North = 27.22 \text{ ft}$$

$$East = 19.45 \text{ ft}$$

$$TVD = 94.01 \text{ ft}$$

Por medio de la ayuda de Matlab, determinamos las coordenadas así:

```

disp('DATOS SURVEY 1')
D1= input('profundidad D1: ');
l1 = input('inclinacion l1: ');
l1=pi*(l1)/180;
Az1 = input('azimut Az1: ');
Az1=pi*(Az1/180);

disp('DATOS SURVEY 2')
D2 = input('profundidad D2: ');
l2 = input('inclinacion l2: ');
l2=pi*(l2)/180;
Az2 = input('azimut Az2: ');
Az2=pi*(Az2)/180;

MD=abs(D1-D2)
B=acos((cos(l1-l2))-(sin(l1)*sin(l2)*(1-cos(Az2-Az1))))
RF=(2/B)*tan(B/2)
North=(MD/2)*(sin(l1)*cos(Az1)+sin(l2)*cos(Az2))*RF
East=(MD/2)*(sin(l1)*sin(Az1)+sin(l2)*sin(Az2))*RF
TVD= (MD/2)*(cos(l1)+cos(l2))*RF
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
DATOS SURVEY 1
profundidad D1: 3500
inclinacion l1: 15
azimut Az1: 20
DATOS SURVEY 2
profundidad D2: 3600
inclinacion l2: 25
azimut Az2: 45

MD = 100
B = 0.2260
RF = 1.0043

```


| DATOS DEL POZO | | | DATOS GENERADOS GYRO | | | | | MINIMA CURVATURA | | | | | TANGENCIAL | | | | | | |
|----------------|------|--------|----------------------|---|-------|---|---------|------------------|-------|--------|-------|---------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|------|
| MD | I | Az | X | Y | TVD | X | Error | Y | error | TVD | error | X | error | Y | error | TVD | error | | |
| 0,00 | 0,00 | | 0,00 | N | 0,00 | E | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| 100,00 | 1,02 | 305,90 | 0,52 | N | 0,72 | W | 99,99 | 0,52 | 0,00 | -0,72 | 0,00 | 99,99 | 0,00 | 1,04 | -0,52 | -1,44 | -0,72 | | |
| 200,00 | 1,20 | 293,32 | 1,45 | N | 2,4 | W | 199,98 | 1,46 | 0,00 | -2,40 | 0,00 | 199,98 | 0,00 | 1,87 | -0,42 | -3,37 | -0,97 | | |
| 300,00 | 1,19 | 293,47 | 2,28 | N | 4,3 | W | 299,95 | 2,29 | 0,00 | -4,32 | -0,02 | 299,95 | 0,00 | 2,70 | -0,42 | -5,27 | -0,97 | | |
| 400,00 | 1,22 | 293,84 | 3,12 | N | 6,22 | W | 399,93 | 3,13 | 0,00 | -6,24 | -0,02 | 399,93 | 0,00 | 3,56 | -0,44 | -7,22 | -1,00 | | |
| 500,00 | 1,22 | 294,09 | 3,98 | N | 8,16 | W | 499,91 | 4,00 | 0,00 | -8,19 | -0,03 | 499,91 | 0,00 | 4,43 | -0,45 | -9,16 | -1,00 | | |
| 600,00 | 1,26 | 299,31 | 4,96 | N | 10,09 | W | 599,89 | 4,97 | 0,00 | -10,12 | -0,03 | 599,89 | 0,00 | 5,51 | -0,55 | -11,08 | -0,99 | | |
| 700,00 | 1,07 | 290,39 | 5,82 | N | 11,93 | W | 699,87 | 5,83 | 0,00 | -11,95 | -0,02 | 699,87 | 0,00 | 6,16 | -0,34 | -12,83 | -0,90 | | |
| 800,00 | 1,07 | 312,93 | 6,79 | N | 13,5 | W | 799,85 | 6,79 | 0,00 | -13,51 | -0,01 | 799,85 | 0,00 | 7,43 | -0,64 | -14,20 | -0,70 | | |
| 900,00 | 0,99 | 321,12 | 8,10 | N | 14,73 | W | 899,83 | 8,10 | 0,00 | -14,74 | -0,01 | 899,83 | 0,00 | 8,77 | -0,67 | -15,28 | -0,55 | | |
| 1000,00 | 0,90 | 316,48 | 9,34 | N | 15,81 | W | 999,82 | 9,34 | 0,00 | -15,82 | -0,01 | 999,82 | 0,00 | 9,91 | -0,57 | -16,36 | -0,55 | | |
| 1100,00 | 0,93 | 306,80 | 10,39 | N | 17 | W | 1099,81 | 10,40 | 0,00 | -17,01 | -0,01 | 1099,81 | 0,00 | 10,88 | -0,49 | -17,66 | -0,66 | | |
| 1200,00 | 0,83 | 301,44 | 11,25 | N | 18,26 | W | 1199,79 | 11,26 | 0,00 | -18,28 | -0,02 | 1199,79 | 0,00 | 11,64 | -0,39 | -18,90 | -0,64 | | |
| 1300,00 | 0,72 | 299,45 | 11,94 | N | 19,43 | W | 1299,79 | 11,95 | 0,00 | -19,45 | -0,02 | 1299,79 | 0,00 | 12,26 | -0,32 | -19,99 | -0,56 | | |
| 1400,00 | 0,77 | 294,42 | 12,53 | N | 20,59 | W | 1399,78 | 12,54 | 0,00 | -20,60 | -0,01 | 1399,78 | 0,00 | 12,81 | -0,28 | -21,22 | -0,63 | | |
| 1500,00 | 0,71 | 296,07 | 13,08 | N | 21,76 | W | 1499,77 | 13,09 | 0,00 | -21,77 | -0,01 | 1499,77 | 0,00 | 13,36 | -0,28 | -22,33 | -0,57 | | |
| 1600,00 | 0,78 | 290,82 | 13,59 | N | 22,95 | W | 1599,76 | 13,60 | 0,00 | -22,97 | -0,02 | 1599,76 | 0,00 | 13,84 | -0,25 | -23,60 | -0,65 | | |
| 1700,00 | 0,68 | 288,92 | 14,03 | N | 24,15 | W | 1699,75 | 14,03 | 0,00 | -24,16 | -0,01 | 1699,75 | 0,00 | 14,23 | -0,20 | -24,72 | -0,57 | | |
| 1800,00 | 0,69 | 283,52 | 14,36 | N | 25,29 | W | 1799,75 | 14,37 | 0,00 | -25,31 | -0,02 | 1799,74 | 0,00 | 14,51 | -0,15 | -25,90 | -0,61 | | |
| 1900,00 | 0,84 | 276,36 | 14,58 | N | 26,6 | W | 1899,74 | 14,59 | 0,00 | -26,62 | -0,02 | 1899,74 | 0,00 | 14,67 | -0,09 | -27,35 | -0,75 | | |
| 2000,00 | 0,59 | 265,17 | 14,62 | N | 27,85 | W | 1999,73 | 14,63 | 0,00 | -27,87 | -0,02 | 1999,73 | 0,00 | 14,58 | 0,04 | -28,38 | -0,53 | | |
| 2100,00 | 0,25 | 260,18 | 14,54 | N | 28,58 | W | 2099,73 | 14,55 | 0,00 | -28,59 | -0,01 | 2099,73 | 0,00 | 14,51 | 0,03 | -28,81 | -0,23 | | |
| 2200,00 | 0,52 | 231,23 | 14,22 | N | 29,14 | W | 2199,72 | 14,23 | 0,00 | -29,16 | -0,02 | 2199,72 | 0,00 | 13,94 | 0,28 | -29,52 | -0,38 | | |
| 2300,00 | 0,76 | 221,68 | 13,44 | N | 29,94 | W | 2299,72 | 13,45 | 0,00 | -29,96 | -0,02 | 2299,72 | 0,00 | 12,95 | 0,49 | -30,40 | -0,46 | | |
| 2400,00 | 0,66 | 223,57 | 12,52 | N | 30,78 | W | 2399,71 | 12,53 | 0,00 | -30,79 | -0,01 | 2399,71 | 0,00 | 12,12 | 0,40 | -31,19 | -0,41 | | |
| 2500,00 | 0,29 | 198,24 | 11,86 | N | 31,26 | W | 2499,71 | 11,88 | 0,00 | -31,27 | -0,01 | 2499,71 | 0,00 | 11,64 | 0,22 | -31,35 | -0,09 | | |
| 2600,00 | 0,38 | 170,12 | 11,30 | N | 31,28 | W | 2599,70 | 11,31 | 0,00 | -31,29 | -0,01 | 2599,70 | 0,00 | 10,98 | 0,32 | -31,24 | 0,04 | | |
| 2700,00 | 0,60 | 170,07 | 10,46 | N | 31,13 | W | 2699,70 | 10,47 | 0,00 | -31,15 | -0,02 | 2699,70 | 0,00 | 9,95 | 0,51 | -31,06 | 0,07 | | |
| 2750,00 | 0,22 | 200,25 | 10,11 | N | 31,12 | W | 2749,70 | 10,12 | 0,00 | -31,13 | -0,01 | 2749,70 | 0,00 | 9,77 | 0,34 | -31,12 | 0,00 | | |
| | | | Promedio error: ft | | | | | 0,00 | | | | -0,02 | 0,00 | | | | -0,17 | -0,55 | 0,01 |

Tabla 1: Comparación de los métodos para calcular la distancia entre dos survey

| TANGENCIAL EQUILIBRADO | | | | | | ANGULO PROMEDIO | | | | | |
|------------------------|-------|--------|-------|---------|-------|-----------------|--------|---------|----------|---------|-------|
| X | error | Y | error | TVD | error | X | Error | Y | error | TVD | Error |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,52 | 0,00 | -0,72 | 0,00 | 99,99 | 0,00 | -88,17 | -88,69 | 46,4 | 47,09 | 100,00 | 0,00 |
| 1,46 | -0,01 | -2,40 | 0,00 | 199,97 | 0,01 | -36,82 | -38,27 | -38,6 | -36,24 | 199,98 | 0,00 |
| 2,29 | -0,01 | -4,32 | -0,02 | 299,95 | 0,00 | 4,97 | 2,69 | -128,3 | -124,03 | 299,96 | 0,00 |
| 3,13 | -0,01 | -6,24 | -0,02 | 399,93 | 0,00 | 47,19 | 44,07 | -217,8 | -211,61 | 399,93 | 0,00 |
| 4,00 | -0,02 | -8,19 | -0,03 | 499,91 | 0,00 | 89,94 | 85,96 | -307,1 | -298,92 | 499,91 | 0,00 |
| 4,97 | -0,01 | -10,12 | -0,03 | 599,88 | 0,01 | 137,04 | 132,08 | -394,2 | -384,16 | 599,89 | 0,00 |
| 5,83 | -0,01 | -11,95 | -0,02 | 699,86 | 0,01 | 181,09 | 175,27 | -483,0 | -471,03 | 699,87 | 0,00 |
| 6,79 | 0,00 | -13,51 | -0,01 | 799,84 | 0,01 | 235,45 | 228,66 | -566,2 | -552,71 | 799,85 | 0,00 |
| 8,10 | 0,00 | -14,74 | -0,01 | 899,83 | 0,00 | 310,41 | 302,31 | -632,6 | -617,85 | 899,83 | 0,00 |
| 9,34 | 0,00 | -15,82 | -0,01 | 999,82 | 0,00 | 387,30 | 377,96 | -696,8 | -680,99 | 999,82 | 0,00 |
| 10,40 | -0,01 | -17,01 | -0,01 | 1099,80 | 0,01 | 455,34 | 444,95 | -769,9 | -752,93 | 1099,81 | 0,00 |
| 11,26 | -0,01 | -18,28 | -0,02 | 1199,79 | 0,00 | 512,97 | 501,72 | -851,2 | -832,92 | 1199,79 | 0,00 |
| 11,95 | -0,01 | -19,45 | -0,02 | 1299,78 | 0,01 | 565,00 | 553,06 | -936,0 | -916,61 | 1299,79 | 0,00 |
| 12,54 | -0,01 | -20,60 | -0,01 | 1399,77 | 0,01 | 611,60 | 599,07 | -1023,9 | -1003,30 | 1399,78 | 0,00 |
| 13,09 | -0,01 | -21,77 | -0,01 | 1499,76 | 0,01 | 655,54 | 642,46 | -1113,1 | -1091,29 | 1499,77 | 0,00 |
| 13,60 | -0,01 | -22,97 | -0,02 | 1599,76 | 0,00 | 696,62 | 683,03 | -1203,5 | -1180,55 | 1599,76 | 0,00 |
| 14,03 | 0,00 | -24,16 | -0,01 | 1699,75 | 0,00 | 731,89 | 717,86 | -1296,3 | -1272,12 | 1699,75 | 0,00 |
| 14,37 | -0,01 | -25,31 | -0,02 | 1799,74 | 0,01 | 761,01 | 746,65 | -1391,1 | -1365,80 | 1799,75 | 0,00 |
| 14,59 | -0,01 | -26,62 | -0,02 | 1899,73 | 0,01 | 779,61 | 765,03 | -1488,3 | -1461,66 | 1899,74 | 0,00 |
| 14,63 | -0,01 | -27,87 | -0,02 | 1999,72 | 0,01 | 782,19 | 767,57 | -1587,0 | -1559,15 | 1999,73 | 0,00 |
| 14,55 | -0,01 | -28,59 | -0,01 | 2099,72 | 0,01 | 770,18 | 755,64 | -1685,5 | -1656,87 | 2099,73 | 0,00 |
| 14,23 | -0,01 | -29,16 | -0,02 | 2199,72 | 0,00 | 729,71 | 715,49 | -1775,9 | -1746,78 | 2199,72 | 0,00 |
| 13,45 | -0,01 | -29,96 | -0,02 | 2299,71 | 0,01 | 661,93 | 648,49 | -1847,3 | -1817,35 | 2299,72 | 0,00 |
| 12,53 | -0,01 | -30,79 | -0,01 | 2399,70 | 0,01 | 589,59 | 577,07 | -1913,8 | -1882,99 | 2399,71 | 0,00 |
| 11,88 | -0,02 | -31,27 | -0,01 | 2499,70 | 0,01 | 504,62 | 492,76 | -1964,3 | -1933,04 | 2499,71 | 0,00 |
| 11,31 | -0,01 | -31,29 | -0,01 | 2599,70 | 0,00 | 405,47 | 394,17 | -1971,0 | -1939,73 | 2599,70 | 0,00 |
| 10,47 | -0,01 | -31,15 | -0,02 | 2699,69 | 0,01 | 307,81 | 297,35 | -1953,0 | -1921,82 | 2699,70 | 0,00 |
| 10,12 | -0,01 | -31,13 | -0,01 | 2749,69 | 0,01 | 258,37 | 248,26 | -1957,1 | -1925,97 | 2749,70 | 0,00 |
| -0,01 | | | -0,02 | | 0,00 | | 405,95 | | -1020,39 | | 0,00 |

Continuación Tabla 1

Comparación de los métodos para calcular la distancia entre dos survey

III. DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA

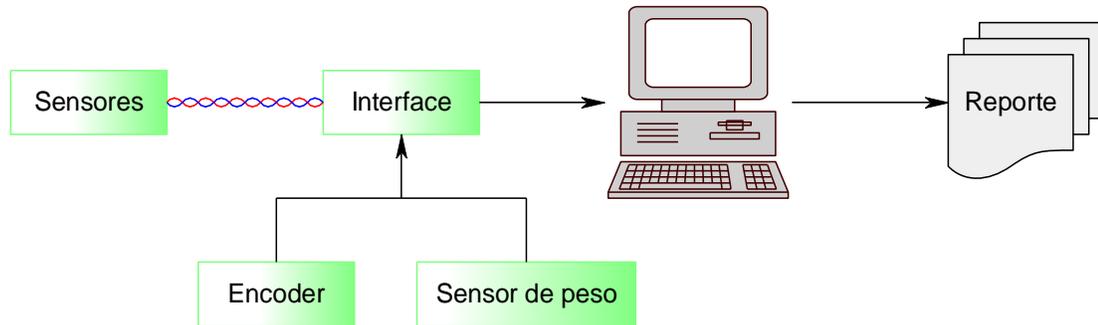


Figura 9: Diagrama en bloques del sistema completo

En el diagrama se diferencia los bloques de sensores, que es la misma herramienta de fondo, Interfaz de comunicación, a su vez el encoder que funciona para tomar datos de la profundidad, sensor de peso y el software instalado en el PC de registro, que procesa la información y entrega el reporte para el cliente.

Sensores: aquí están instalados los sensores de aceleración y de giro los cuales nos proporcionan la inclinación y el ángulo de azimut. Se alimentan a través de un cable eléctrico que va comunicando desde el fondo hasta la superficie. Este lleva la información recogida por la sensorica y previamente procesada por un pic la transmite a la interfaz que está ubicada en superficie.

Interface: La información que es transmitida por el cable eléctrico, llega a la interfaz de superficie es decodificada, enviada a la telemetría, a la cual le llegan la señal proveniente del detector de fase del encoder y al mismo tiempo la señal del conversor A/D y el conversor I/V del sensor de peso, es procesada y enviada a través del USART al computador de registro.

Encoder: Este instrumento toma la profundidad media (MD) acoplado a través de un disco de teflón al cable eléctrico que baja la herramienta al fondo del pozo.

Sensor de peso: Es una celda de carga que toma el peso de la herramienta cuando se baja o se saca del pozo

Computador de registro: este recibe la señal proveniente de la telemetría a través del puerto USB. En él está el software necesario para procesar la información y con ella se genera el reporte del registro que va dirigido al cliente.

3.1. Diseño de la Herramienta de Fondo

Para el diseño de la herramienta de fondo se partió de la experiencia de otras herramientas que en el mercado de servicios ofrecen esta clase de análisis de la trayectoria de pozos y estudiando la data de un pozo de prueba conocido, se llegó a la conclusión que por medio de la utilización de sensores de aceleración se podía calcular la inclinación en un determinado punto y a través de sensores Gyro se obtiene el ángulo de azimut, en consecuencia se utilizó el Acelerómetro ADXL150AQC y el Gyro XRS300AL de fabricación de Analog Devices instalados ambos en el mismo impreso.

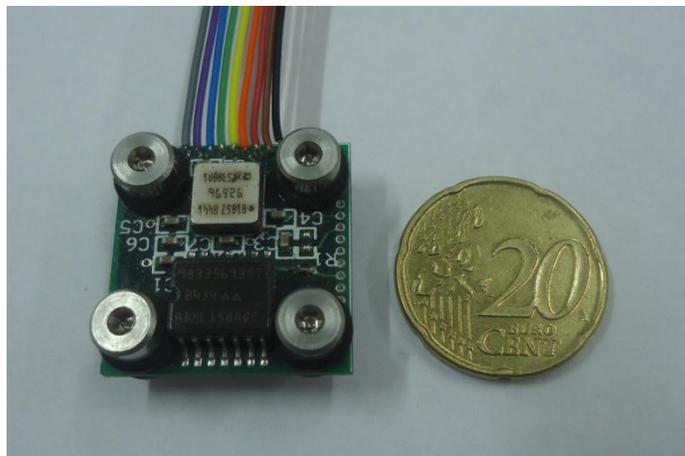
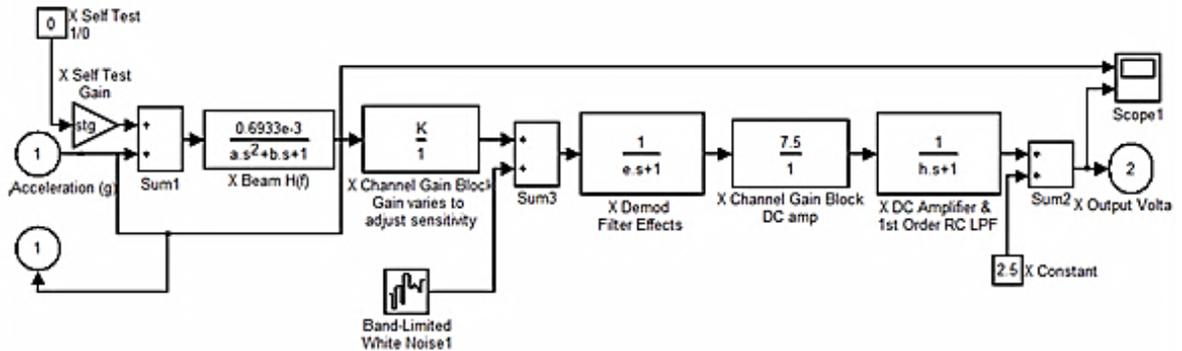


Figura 10: Acelerómetro ADXL150AQC y Gyro XRS300AL

Se utilizó el Matlab para modelar el Acelerómetro y gracias a la información técnica proporcionada por Analog Devices, se construyó el Simulink.

Esta información incluía, la función de transferencia del sensor y constantes de diseño de Amplificador CD, demodulador, ruido blanco, self test y offset.

ADXL150 Behavioral Model



Model coefficients for 5V operation only.

Version 5.0 of ADXL150 Accelerometer
Analog Devices Dec. 14, 2004

Figura 11: Simulink del acelerómetro ADXL150AQC

Además se construyó un programa para introducir al Simulink, una señal para simular la entrada de la aceleración variando de 1g a -1 g, obteniendo una salida acorde a la forma de funcionamiento del sensor, bajo esta excitación.

A continuación en las figuras 12 y 13, se muestra la señal de entrada y la señal de salida, donde se observa que este sensor tiene una sensibilidad de 1.2 mV/g sobre un voltaje de offset de $V_s/2$, o sea 2.5voltios, según especificaciones técnicas del datasheet.

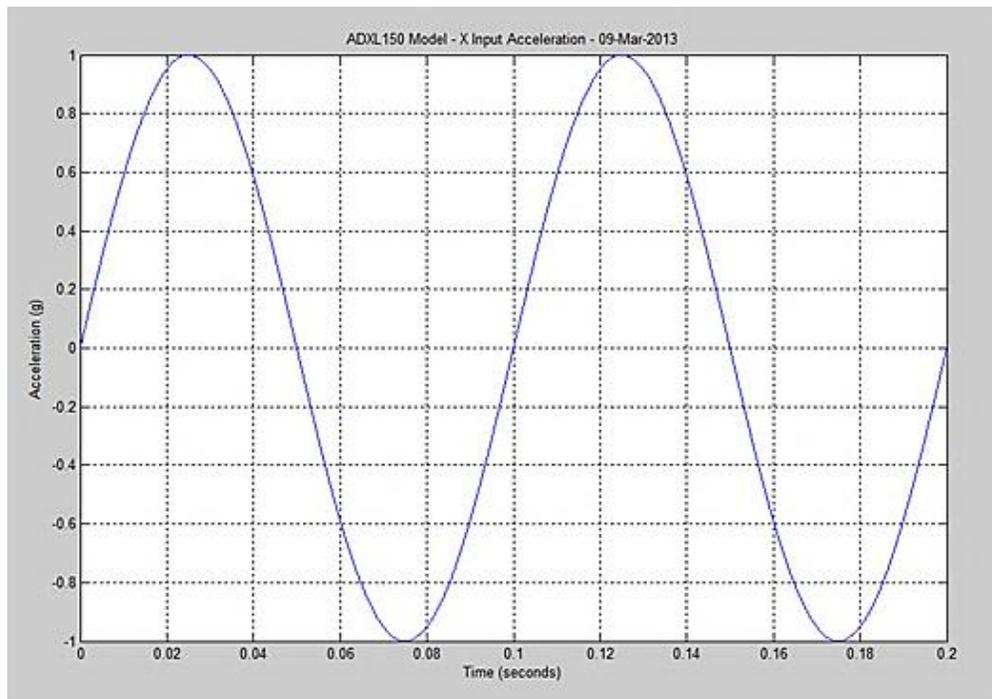


Figura 12: Entrada simulada de aceleración

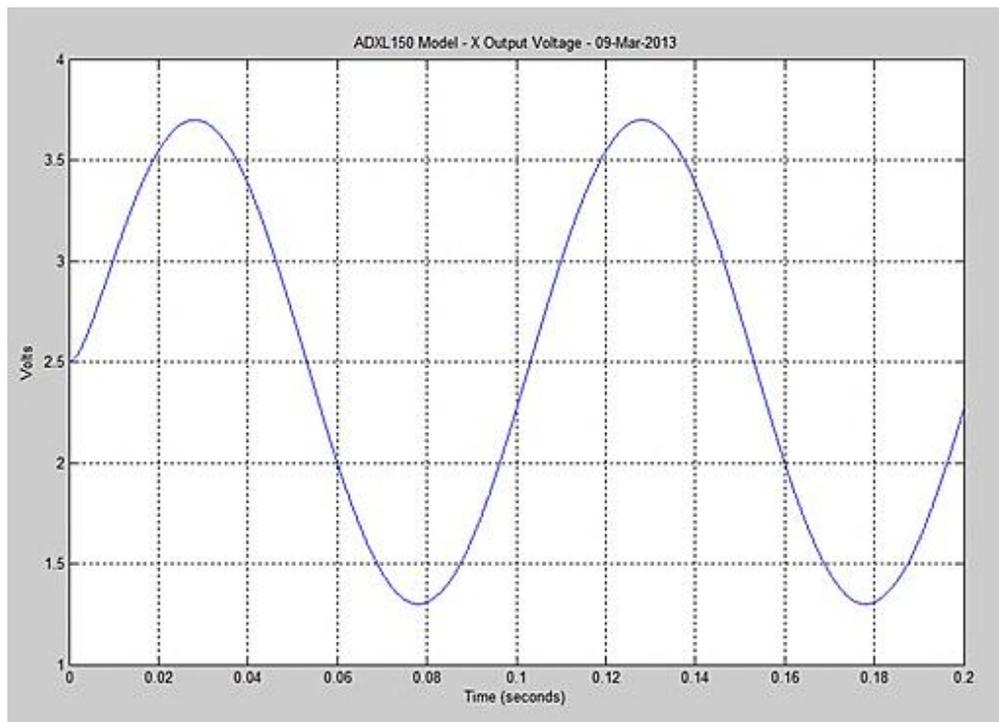


Figura 13: Salida del acelerómetro con entrada de 1g variando sinodalmente

Se sigue el procedimiento y análisis para calcular la inclinación en un punto determinado, mediante los datos recogidos por el acelerómetro.

Pillajo Obando y Robayo Cajamarca [15] explican : la fuerza de gravedad g es contrarrestada mediante la fuerza normal F_n , de manera que $g = F_n$. En realidad, el acelerómetro mide la fuerza normal que actúa sobre la superficie en la que se encuentra el dispositivo.

Cuando se inclina el acelerómetro un ángulo α , la salía del acelerómetro A_x será la proyección de la fuerza normal F_n sobre el eje X del acelerómetro.

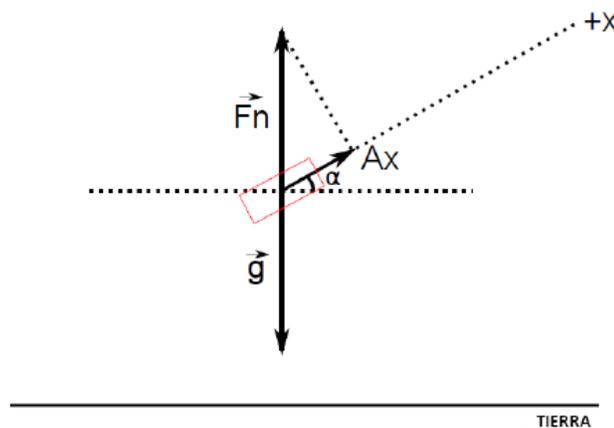


Figura 14: Calculo de la inclinación en el eje x usando Acelerómetro. Tomado de la pág 82 [15]

Para un valor por ejemplo de $1g$, se deduce que fácilmente la aceleración de salida mediante la relación:

$$Ax[g] = 1g * \cos(\alpha)$$

Así que el ángulo de inclinación se calcula mediante:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{Ax[g]}{1g}\right)$$

$1g$ = aceleración de la tierra

α = inclinación

Debido a que este método utiliza solamente un eje y requiere del vector gravedad, el cálculo del ángulo de inclinación es preciso solamente cuando

el vector está orientado de manera que el eje X siempre permanezca en el plano de la gravedad.

Donde A_x es la aceleración en el eje X:

$$A_x = \frac{V_{out}(x) - V_{offset}(x)}{\frac{\Delta V}{\Delta g}(x)}$$

$V_{out}(x)$ = salida del acelerómetro en voltios del eje x
 $V_{offset}(x)$ = offset del acelerómetro a cero g del eje x
 $\Delta V/\Delta g(x)$ = sensibilidad del acelerómetro del eje x

Para hacer más preciso este dato se utilizó dos acelerómetros mono axiales, ubicados formando ángulo de 90° los cuales sensa la gravedad en los ejes X e Y.

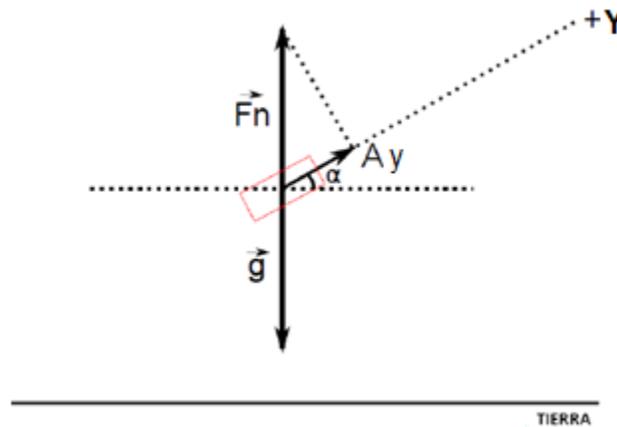


Figura 15: Calculo de la inclinación en el eje y

Para el eje Y se utiliza el mismo principio que se utilizó para el eje X, tenemos:

$$A_y[g] = 1g * \sin(\alpha)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{A_y[g]}{1g}\right)$$

$$A_y = \frac{V_{out}(y) - V_{offset}(y)}{\frac{\Delta V}{\Delta g}(y)}$$

A_y = aceleración en el eje y

$V_{out}(y)$ = Salida del acelerómetro en voltios en el eje y

V_{offset} = offset del acelerómetro a cero g en el eje y

$\Delta V/\Delta g(y)$ = sensibilidad del acelerómetro en el eje y

Como los acelerómetros que mide la aceleración en el eje x es diferente al que mide la aceleración en el eje y, (acelerómetros mono axiales uno para cada eje) los valores de A_x , $V_{out}(x)$, $\Delta V/\Delta g(x)$, son diferentes a los valores de A_y , $V_{out}(y)$ y $\Delta V/\Delta g(y)$.

El acelerómetro empleado tiene una sensibilidad típica de 1,2 mv/g y el offset sobre cada eje se mide con una aceleración a 0 g. En este caso con el ADXL150AQC el offset para el eje X para el eje Y es 2,5 V y el ancho de 100 Hz.

Al combinar el efecto de ambos acelerómetros desfasados 90° con respecto al mismo eje se obtiene la aceleración en X e Y. Su ubicación dentro de la herramienta se muestra en la figura 16.

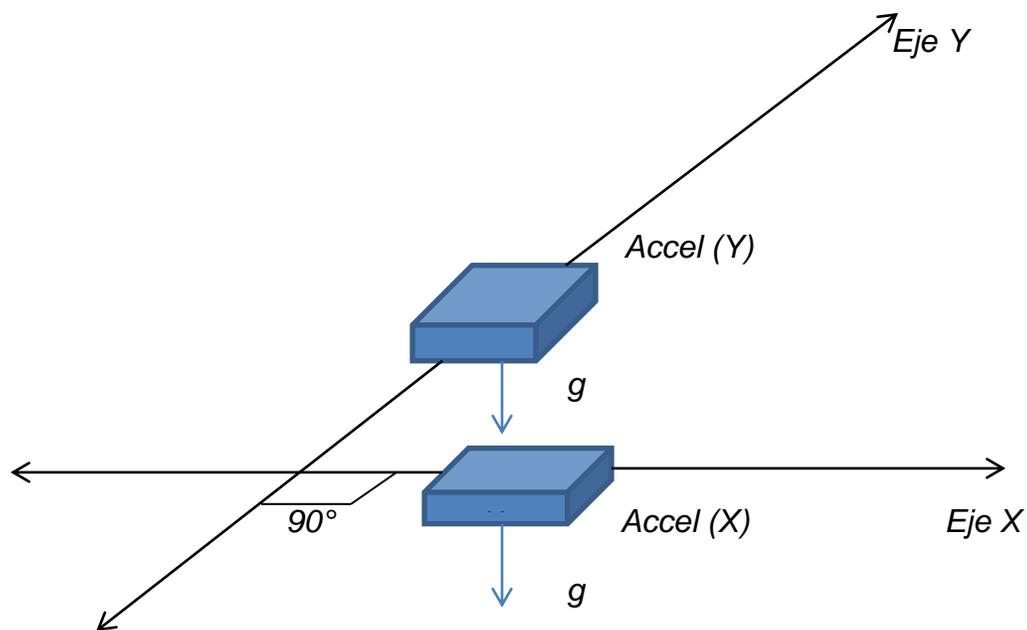


Figura 16: Acelerómetros a 90° para obtener lecturas de aceleración en X e Y

De ahora en adelante el acelerómetro X y el acelerómetro Y se manejará como una sola unidad.

Así de esta forma, el ángulo de inclinación que sensa el acelerómetro es el arco tangente del efecto de la gravedad en el eje Y (A_y) dividido entre el efecto de la gravedad en el eje X (A_x).

A continuación se muestra como lo indica Parallax Inc. en Sensores Inteligentes, Guía del Estudiante versión 1.0, lo que el acelerómetro detecta y como lo relaciona al arco tangente de la relación de A_y entre A_x . De esta forma, si en ángulo Θ es de 0° , entonces A_y sensa 0 gravedad, y A_x sensa 1 g, el arco tangente de $0/1$ es 0° .

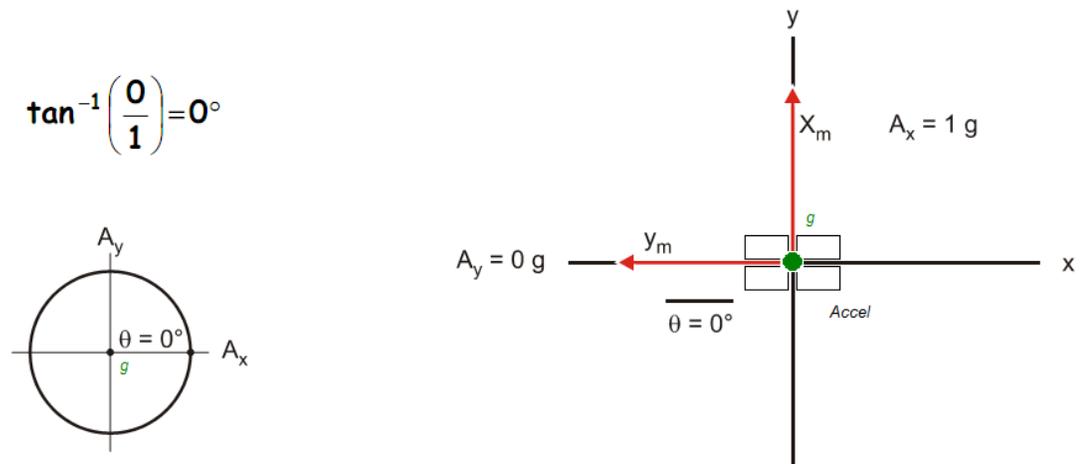


Figura 17: Acelerómetro inclinado a 0° . Tomado pág 104 [17]

Cuando el acelerómetro se giro 30° la componen de la gravedad actuando en el eje x del acelerómetro es aproximadamente $\sqrt{3/2} g$, la componente de la gravedad actuando en el eje y es $1/2 g$, y el arco tangente $(1/2)/\sqrt{3/2}$ es 30° .

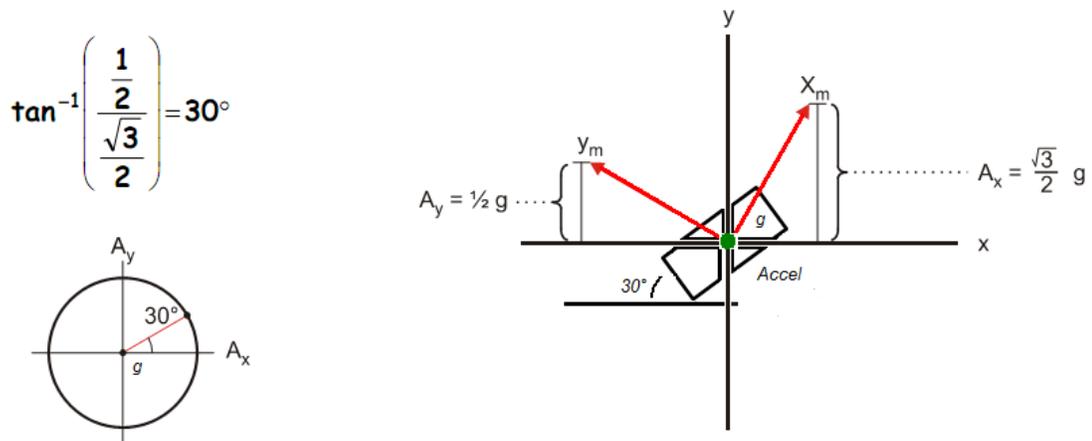


Figura 18: Acelerómetro girado a 30° . Tomado de pág 105 [17]

En cuanto a los Gyro, solo es necesario utilizar la información de uno, ya que al estar ubicados ambos formando ángulo de 90°, debido a que están integrados en la misma PCB, siempre se obtendrá la tasa de cambio de azimut con una diferencia respecto el dato de un al otro de 90° y se torna redundante esta información.

Además de esta informaciones de aceleración y gyro, este sistema nos proporciona datos de temperatura que dado el caso es importante para el cliente.

3.1.1 Diagramas de Bloques de la Herramienta de Fondo

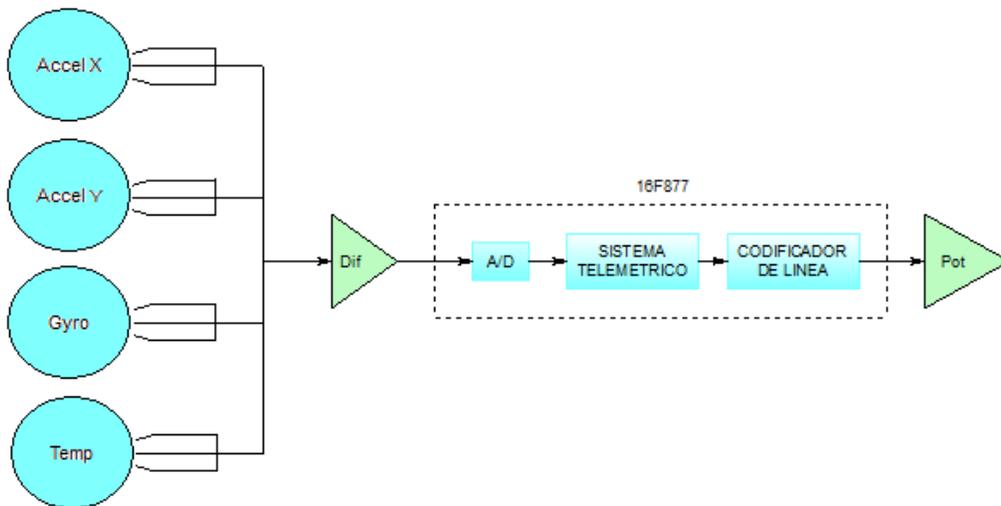


Figura 19: Diagrama en bloques de la herramienta de fondo

LPF (Dif): Las señales eléctricas provenientes de los acelerómetros X e Y, y del sensor de temperatura son a condicionadas por el bloque LPF que hace un filtrado de las frecuencias altas y monta la señal sobre un pedestal DC.

A/D: Este bloque se implementó con líneas de código utilizando el Conversor A/D del PIC, transformando las señales analógicas filtradas del bloque LPF a pulsos digitales.

Sistema Telemétrico: La telemetría nos permite la medición remota de magnitudes físicas como la aceleración, giro y temperatura desde una posición distante al lugar donde se producen los fenómenos cuando existen

limitaciones de acceso y el posterior envío de la información hacia el operador del sistema.

Codificador de Línea: Es el sistema que codifica la señal de la telemetría para ser enviada a la etapa de potencia. Por sencillez se escoge la codificación NRZ bipolar.

Potencia: La señal codificada llega a la etapa de potencia que acondiciona la señal para ser enviada a la superficie a través del cable eléctrico mono conductor y provee los voltajes que la herramienta necesita.

3.1.2 Acondicionador LPF

Para diseñar este bloque se tuvo en consideración la frecuencia que se necesita filtrar y el ancho de banda de la salida de los sensores de Aceleración y Temperatura.

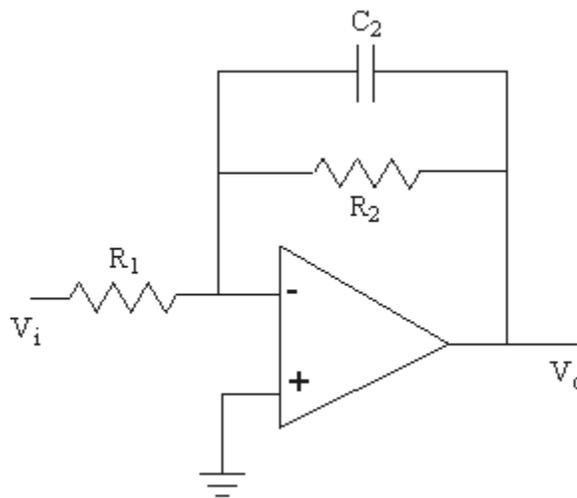


Figura 20: Acondicionador LPF

Las ecuaciones de diseño del filtro pasa bajos de primer orden son:

Ganancia estática:

$$G = R_2/R_1$$

Frecuencia de corte:

$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * R_2 * C_2}$$

Determiné la función de transferencia:

$$Trans\ Func = \frac{R2}{R1(R2C2s + 1)}$$

Para frecuencias lo suficientemente bajas, el condensador C2 puesto en paralelo con la resistencia R2 actúa como un circuito abierto, pudiendo ser ignorado, con lo cual lo que tenemos aquí es esencialmente un amplificador inversor. Y para frecuencias lo suficientemente altas, el condensador C2 actúa como un corto circuito, con lo cual el efecto resistivo de R2 queda nulificado y la ganancia, de acuerdo con la fórmula para el amplificador inversor, se vuelve cero. En pocas palabras, el circuito amplifica y deja pasar las señales de bajas frecuencias, y bloquea las señales de altas frecuencias.

Este comportamiento es representado con una figura conocida como la curva de respuesta a la frecuencia (frequency response curve) que para un filtro de paso bajo toma la siguiente apariencia:

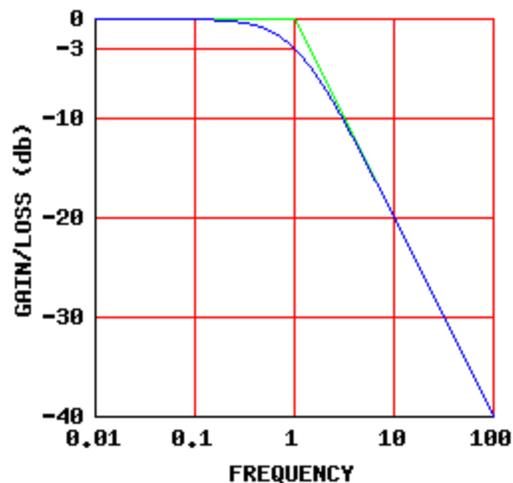


Figura 21: Respuesta del filtro pasa bajos. Tomado de <http://conocimientosoperationalamplifiers.blogspot.com/2010/02/11-publicacion.html>

3.1.3 Conversor Análogo/Digital

Para implementar el Conversor Análogo a Digital se utilizó el PIC16f877, utilizando solo cuatro de los ocho entradas que tiene disponible, con una resolución de 10 bit.

Las entradas quedaron distribuidas así:

AN0 = entrada sensor acelerómetro eje X
AN1 = entrada sensor acelerómetro eje Y
AN2 = entrada sensor de giro
AN3 = entrada sensor de temperatura.

Se tuvo muy en cuenta las siguientes características obtenidas del datasheet del PIC, pues de ello depende en gran medida el buen funcionamiento de la herramienta.

Después de que el módulo A / D se ha configurado como se desee, el canal seleccionado debe ser adquirido antes de que se inicie la conversión. Los canales de entrada analógica tienen sus correspondientes bits de TRIS seleccionados como entradas. Después de que el tiempo de adquisición haya transcurrido, la conversión A / D puede iniciar.

Para realizar una conversión A / D, se sigue los pasos:

1. Configure el módulo A / D:
 - Configurar pines analógicos / referencia de tensión y entradas y salidas digitales (ADCON1)
 - Seleccione un canal de entrada A / D (ADCON0)
 - Seleccione un reloj de conversión A / D (ADCON0)
 - Encienda un módulo / D (ADCON0)
2. Configurar las interrupciones A / D (si lo desea):
 - Borrar bit ADIF (bit de flag de interrupción del conversor A/D)
 - Establecer el bit ADIE (bit que habilita la interrupción del conversor A/D)
 - Establecer el bit PEIE (bit que habilita interrupción periférica)
 - Establecer el bit GIE (bit que habilita interrupción global)
3. Esperar el tiempo de adquisición requerido.
4. Iniciar la conversión:
 - Setee el bit GO / DONE (ADCON0)
5. Espere a que la conversión A / D sea completada ya sea por:
 - Sondeo para el bit GO / DONE para ser limpiado (interrupciones desactivadas), o
 - Esperar la interrupción A / D
6. Leer el registro del resultado A/D (ADRESH: ADRESL), ADIF poco claro si es necesario.
7. Para la próxima conversión, vaya al paso 1 o paso 2 según se requiera. El A / D tiempo de conversión por bit es definido como T_{AD} .

Requisitos de Adquisición

Para que el convertidor A / D satisfaga la exactitud específica, el condensador de retención de carga (C_{Hold}) debe permitir la carga completamente al nivel de voltaje del canal de entrada. El modelo de entrada analógica se muestra en la figura 22. La fuente de impedancia (R_S) y la impedancia del interruptor interno de muestreo (R_{SS}) afecta directamente el tiempo necesario para la carga de condensador C_{Hold} . La impedancia del interruptor de muestreo (R_{SS}) varía con la tensión del dispositivo (V_{DD}); véase la Figura 22. La máxima impedancia recomendada para fuentes analógicas es de 2,5 k Ω . A medida que la impedancia disminuye, el tiempo de adquisición puede ser disminuido. Después se selecciona el canal de entrada analógica (cambiado), esta adquisición se debe hacer antes de que la conversión se inicie.

El tiempo mínimo de adquisición para este PIC es de 19.72 μ s según el datasheet. Este tiempo supone que se utiliza de error 1/2 LSB (1024 pasos para el A/D). El error 1/2 LSB es el error máximo permitido para el A/D para cumpla con la resolución especificada.

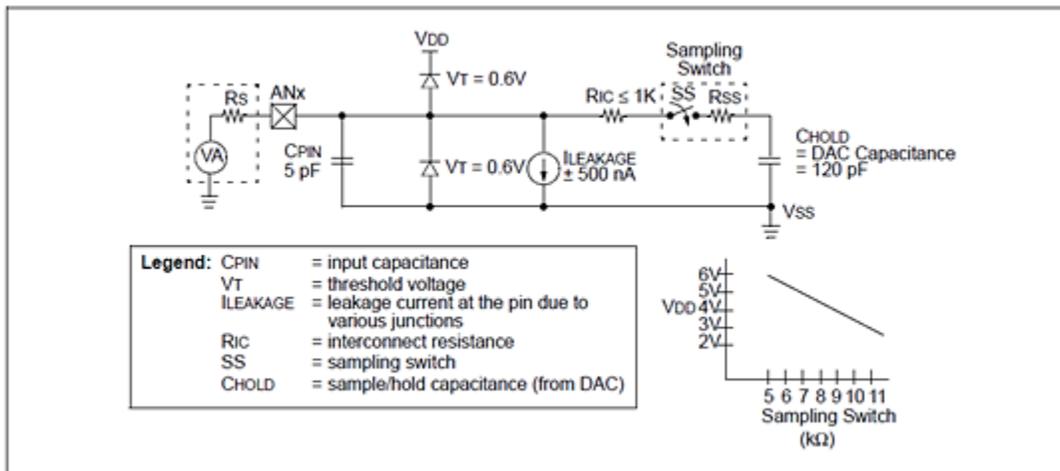


Figura 22: Modelo de entrada analógica

Selección del reloj de conversión A / D

El tiempo de conversión por bit se define como TAD. La conversión A / D requiere un mínimo de 12 TAD por 10 bits conversión. La fuente del reloj de conversión se selecciona por software. Las siete posibles opciones para TAD son:

- 2 TOSC
- 4 TOSC
- 8 TOSC
- 16 TOSC
- 32 TOSC
- 64 TOSC
- Interna A / D del módulo oscilador RC (2-6 ms)

Para corregir las conversiones A/D, el reloj de conversión A/D (T_{AD}) debe seleccionarse para asegurar un tiempo mínimo T_{AD} de 1,6 ms. La Tabla 2 muestra los tiempos de T_{AD} resultantes derivados de las frecuencias de funcionamiento del dispositivo y la fuente seleccionada del reloj de A/D.

Tabla 2
Tiempos TAD y frecuencia máxima del dispositivo

| AD Clock Source (T _{AD}) | | Maximum Device Frequency |
|------------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Operation | ADCS2:ADCS1:ADCS0 | |
| 2 Tosc | 000 | 1.25 MHz |
| 4 Tosc | 100 | 2.5 MHz |
| 8 Tosc | 001 | 5 MHz |
| 16 Tosc | 101 | 10 MHz |
| 32 Tosc | 010 | 20 MHz |
| 64 Tosc | 110 | 20 MHz |
| RC ^(1, 2, 3) | x11 | (Note 1) |

Note 1: The RC source has a typical T_{AD} time of 4 μs but can vary between 2-6 μs.

2: When the device frequencies are greater than 1 MHz, the RC A/D conversion clock source is only recommended for Sleep operation.

3: For extended voltage devices (LF), please refer to Section 17.0 "Electrical Characteristics".

En consecuencia se define los siguientes requerimientos del convertidor analógico a digital para obtener óptimos resultados.

Requerimientos del Convertidor A/D

$$1 T_{AD} = 32 T_{osc} (12 \text{ MHz})$$

$$1 T_{AD} = (1/12 \text{ MHz}) * 32 * 4 = 10,67 \mu\text{s} \rightarrow \text{Se cumple que } 1 T_{AD} > 1,6 \mu\text{s}$$

$$T_{ACQ} + T_{conv} + 2 T_{AD}$$

$$19,72 \mu\text{s} + 12 T_{AD} + 2 T_{AD}$$

$$19.72\mu\text{s} + 149.38\mu\text{s}$$

$$169.05\mu\text{s}$$

$$169.05 \mu\text{S por conversión} + 80.95 \mu\text{seg (instrucciones)} = 250 \mu\text{seg (aprox)}$$

$$\text{conv / seg} = 3\text{ch} \cdot 10\text{vez / seg} + 1\text{ch} \cdot 1000\text{vez / seg} = 1030\text{conv / seg}$$

Calculando el tiempo de las conversiones

$$T_{\text{conv}} = 1030\text{conv} \cdot 250\mu\text{seg} = 257.5\text{mseg}$$

Es decir, el conversor A/D satisface las necesidades de digitalización del sistema

Para programar el PIC se utilizó el compilador de CCS.

3.1.4 Sistema de Telemetría

Los sensores usados tienen los siguientes anchos de banda

Tabla 3
Ancho de banda de los sensores

| SENSOR | BANDWIDTH |
|---------------|-----------|
| Gyro | 100hz |
| Accelerometer | 400hz |

En la realidad las condiciones cambian, es decir, en condiciones críticas el acelerómetro nunca se va a mover más de una gravedad por segundo;

Cuando la sarta se mueve dentro de la tubería la velocidad angular si puede tener picos rápidos en los cambios de inclinación, es decir,

Tabla 4
Ancho de banda escogida para el diseño

| SENSOR | BANDWIDTH |
|---------------|-----------|
| Gyro | 100hz |
| Accelerometer | 1hz |

El ancho de banda máximo de los sensores es de 100 Hz.

Para determinar los datos necesarios para obtener el survey (Azimut y desviación), se necesitan los datos del Accelerometer y la corrección de giro de la herramienta dada por una Gyro en el plano XY.

Para obtener una buena resolución en la digitalización, se selecciona 10 veces el máximo ancho de banda como la frecuencia de muestreo, es decir,

$$T_s = \frac{1}{10F_c} = \frac{1}{10 \cdot 10\text{Hz}} = 0.1\text{seg} \qquad F_s = 10\text{Hz}$$

Tabla 5
Ráfaga de bits que se desea enviar por el cable a superficie

| SEÑAL | DURACION |
|---------------------|------------------|
| Sincronismo | 8 bits (A5h) |
| Tipo de herramienta | 8 bit(256 tipos) |
| Serial | 8 bits (256) |
| AccelX | 10 bits |
| AccelY | 10 bits |
| Temp | 10 bits |
| Gyro | 40 bits |
| Checksum | 8 bits |
| TOTAL | 102 bits |

Lo anterior implica que se deben transmitir 10 veces/seg toda la ráfaga, es decir,

$$\text{bits} / \text{seg} = 10\text{veces} / \text{seg} \cdot 102\text{bits} / \text{vez} = 1102\text{bits} / \text{seg}$$

3.1.5 Decodificador de Línea

Una vez armados los paquetes de bits por el conversor A/D y la telemetría se envía a la etapa de potencia.

Como la transmisión de bits/seg es baja, tan solo 1102bits/seg, la decodificación realizada es muy sencilla, solo se envía los bits organizados, enviando primero una señal que se puede identificar como un pseudo-sincronismo equivalente a A5h para que el sistema lo reconozca y así saber cuándo empieza el paquete transmitido.

3.1.6 Potencia

Como se mencionó, una vez los paquetes de bits están listos, se envía a la etapa de potencia que es la encargada de introducir estos bits al cable

eléctrico mono conductor y así transmitir la información del acelerómetro, azimut y temperatura a superficie para ser procesados.

La etapa de potencia en sí está dividida en dos partes. Una para “montar” los bits que salen del PIC y el otro supe de alimentación la herramienta, pero ambas trabajan de manera unísona.

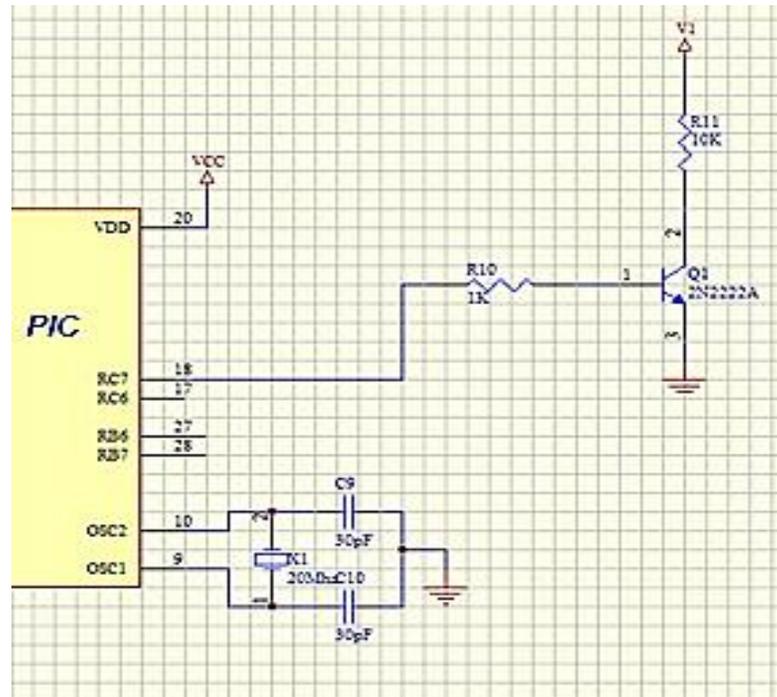


Figura 23: Salida del PIC y entrada al circuito que introduce los bits al cable

Para diseñar este circuito, se quiso que la corriente de base I_B Fuese igual a 4mA y la corriente I_C igual a 6mA, de esta forma el transistor 2n2222 trabaja en conmutación, haciendo variar la impedancia de la línea que lleva 60 voltios asegurando que no se afecte la fuente principal que está ubicada en superficie dentro del sistema de adquisición.

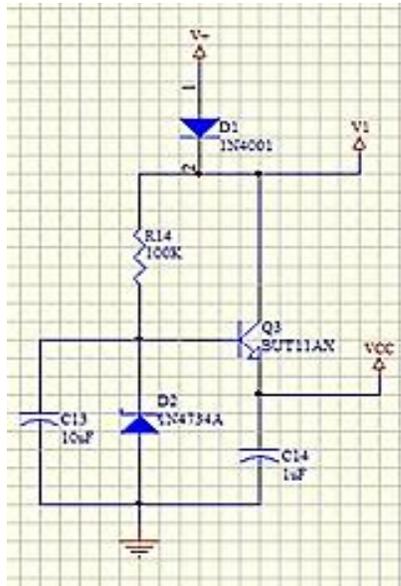


Figura 24: Circuito que supe de voltajes a la herramienta

El funcionamiento es elemental, el circuito de la figura 24, recibe el voltaje enviado por el sistema de adquisición (la adquisición se detallará más adelante) que es aproximado a 60 voltios continuos, pasa por el D1, donde se desprende al circuito de la figura 23, luego se filtra, y se reduce a un voltaje regulado (VCC) que alimenta al PIC, acelerómetro y gyro.

La idea del circuito de la figura 23 es de aumentar y disminuir la impedancia del sistema a través de la conmutación al ritmo de la salida binaria que lleva la información tomada por los sensores. Esta señal va “montada” sobre los 60 voltios del cable, el D1 evita que estos pulsos interfieran en la alimentación de la herramienta y al final está la regulación que mantiene el voltaje fijo de 5.6voltios (VCC).

Respecto al circuito que filtra y regula el voltaje, consiste en un diseño de circuito regulador lineal a transistor, (ver figura 24) al cual se le coloca un diodo zener de 5.6voltios en la base, una resistencia R14 que limita la corriente que pasa por este Zener para que no se dañe por temperatura provocada por sobre corriente y el transistor BUT11AX es el que maneja la potencia que requiere el PIC, el sensor acelerómetro y el gyro.

Este diseño se simuló con Proteus y funciona bien, además se tuvo en cuenta la caracterización del cable proveída por el fabricante, equivalente una atenuación y capacitancias parasitas de 32000 pies de cable.

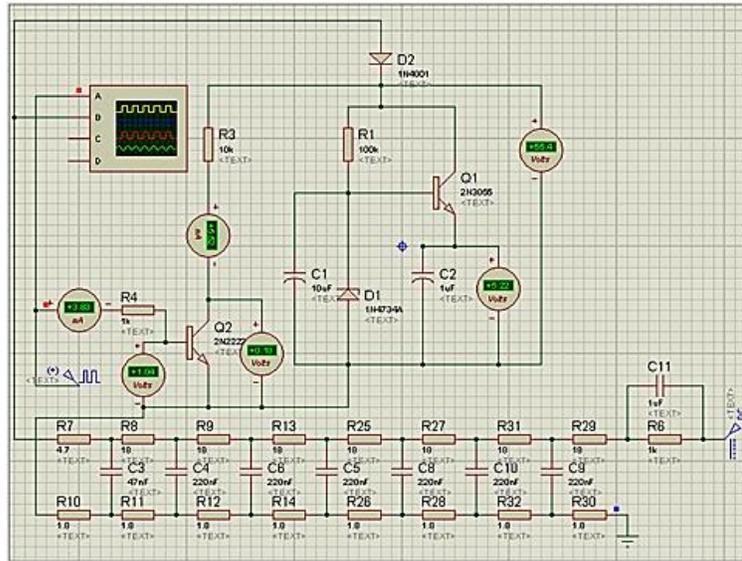


Figura 25: Simulación en Proteus del circuito de potencia.

En esta figura se distingue claramente el equivalente del cable eléctrico mono conductor correspondiendo las resistencias R7 a R30 y las capacitancias parásitas de C3 a C9. La resistencia R6 y el condensador C11 se refieren a la impedancia y capacitancia de la fuente de voltaje que esta ubicada dentro del sistema de adquisición de superficie.

Se observa en la figura 26, el resultado de la simulación, aquí en amarillo se representa el tren de pulsos proveniente del PIC (información digitalizada recogida por la sensorica) y en azul, esta misma señal montada sobre el nivel de 60voltios provenientes del sistema de adquisición.

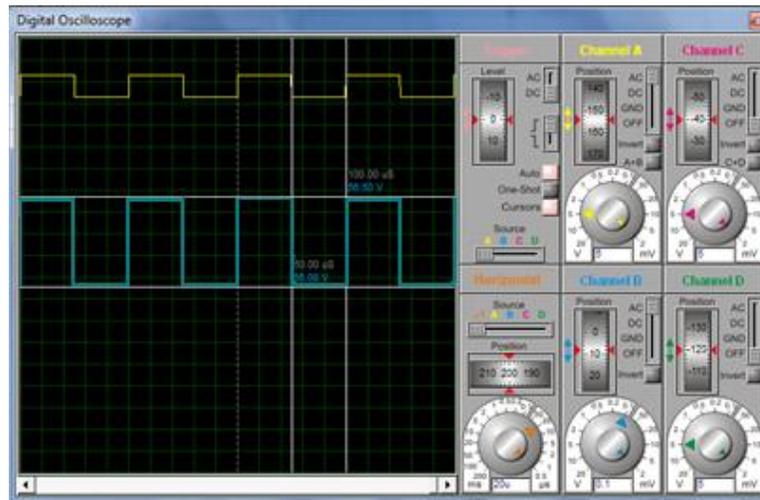


Figura 26: Oscilograma de la simulación del circuito de potencia

IV. DISEÑO DE LA INERFAZ DE COMUNICACIÓN

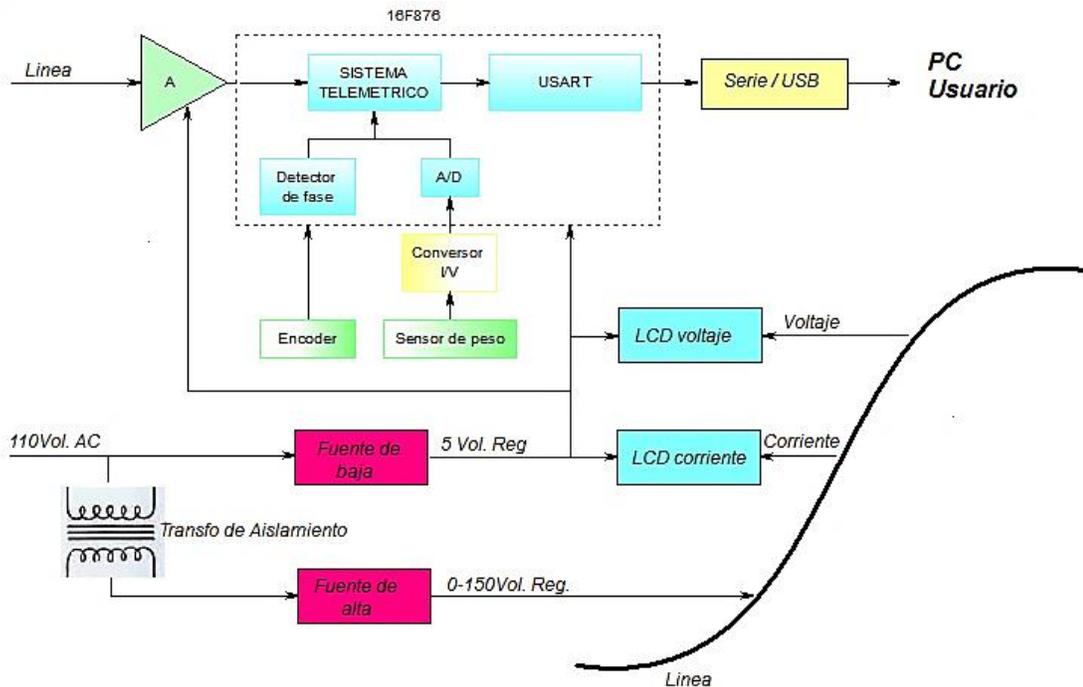


Figura 27: Diagrama en bloques de la interfaz de comunicación

Es necesario establecer comunicación entre la herramienta de fondo o sarta y el computador del usuario ubicado en superficie, en donde se procesa la información de Azimut, Inclinación y Temperatura tomada por la sensorica (herramienta de fondo). Para ello se diseñó la Interfaz de Comunicación la cual consta de los siguientes bloques:

Fuente de baja: toma los 120 voltios AC de la red, los reduce y regula a 5 voltios DC, para alimentar al PIC, y demás circuitos que hacen parte de la caja de adquisición, integrados de acondicionamiento, LCD de corriente y LCD de voltaje.

Fuente de alta: A través de un transformador de aislamiento con relación de 1:1 toma los 120 voltios de la red, los regula de 0 hasta 160 voltios DC y este voltaje que alimente a muestra herramienta de fondo. Esta tensión se muestra por un LCD, al igual que la corriente.

LCD voltaje: muestra el voltaje que alimenta la herramienta de fondo.

LCD corriente: muestra la corriente que consume la herramienta de fondo.

Acondicionador de señal (A): la línea que lleva el voltaje de alimentación a la herramienta, también trae la señal de los sensores de aceleración, gyro y temperatura. En este bloque se acondiciona la señal, para entregársela al PIC16F876 a un nivel adecuado para que sea procesada

Encoder: es el que nos indica la MD o profundidad medida (muy importante para determinar la longitud entre dos survey).

Detector de fase: es el encargado de distinguir la dirección en la cual se mueve el cable eléctrico mono conductor, es decir si entra al pozo o sale

Conversor I/V: convierte la señal de la celda de carga a voltaje (se deja como opción como mejora el sistema)

Sensor de peso: Habitualmente los equipos de Electric Line, utilizan celdas de carga para conocer el peso de la sarta. En este sistema no es necesario conocer el peso de la sarta (al igual que la temperatura), ya que con este dato no se procesa ninguna información, solo se deja para implementarlo para futuras mejoras.

Conversor A/D: este conversor sirve para pasar de señal analógica a digital proveniente del sensor de peso, que en futuras aplicaciones se pudiese implementar.

Los bloques de Detector de fase, A/D, Sistema telemétrico, Decodificador de línea y USART, se implementa con líneas de código con programación del PIC16F876A, que fue el utilizado para esta aplicación.

USART: Se configura el módulo de USART del pic para que entregue la salida al computador del usuario, pero antes se debe convertir a USB a través del último bloque.

Conversor Serial/USB: El pic tiene salida por USART o como se conoce popularmente el SCI (serial communications transmitter), y este lo convierte a USB para conectarse al computador del usuario, en el cual tiene el software que da el procesamiento final de la información. Este bloque no se diseñó, porque se consigue con facilidad en el comercio.

Línea: es el cable mono conductor por el cual se lleva el voltaje de 0-150 voltios (aunque la herramienta de fondo trabaja a partir de 60 voltios) y la señal de la sensórica.

PC Usuario: Aquí se encuentra el software encargado de analizar los datos recibidos por parte de la sensórica de fondo (herramienta de fondo)

4.1. Fuente de Baja

Todas las unidades de registros tiene generador que provee 120 voltios AC, por lo tanto se necesita una fuente que reduzca este voltaje a 5 voltios regulados, para alimentar el PIC, integrados de acondicionamiento, LCD de corriente y LCD de voltaje.

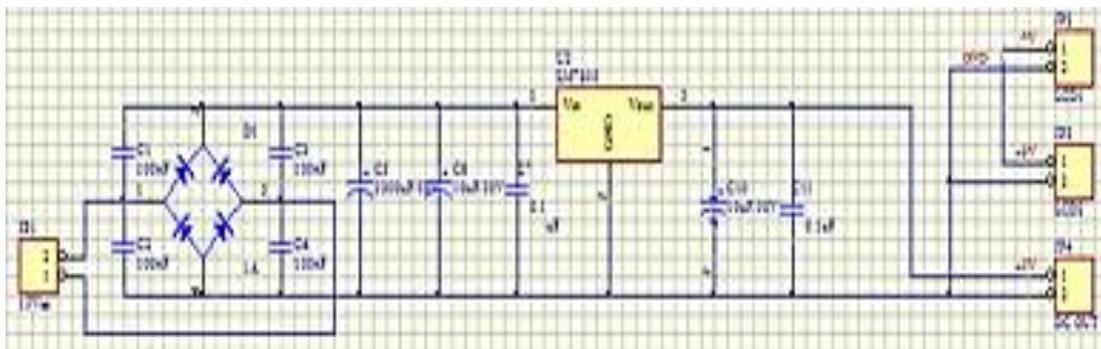


Figura 28: Diagrama electrónico de la fuente de baja.

Un transformador toma los 120 voltios AC, los reduce a 9 voltios AC luego se rectifica, filtra y se regula para proporcionar 5 voltios a 1 Amperio, suficientes para alimentar los circuitos internos de la caja de adquisición.

El circuito integrado que se escogió para realizar la regulación fue el LM7805, que entrega 5 voltios regulados 1.5 Amperios.

4.2 Fuente de Alta

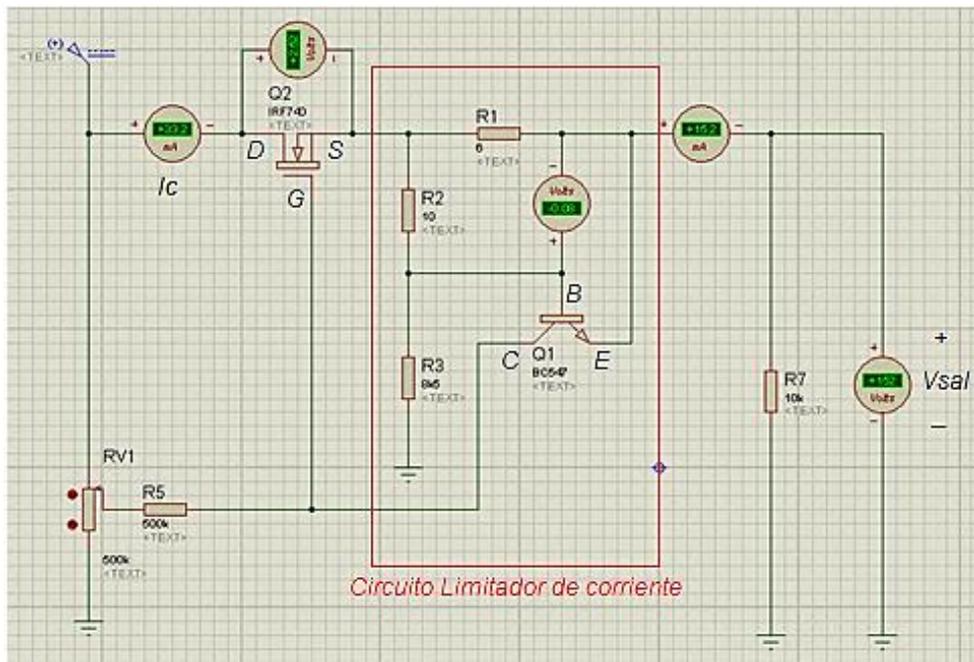


Figura 29: Diagrama electrónico del circuito limitador de corriente

El diseño de la fuente de alta es más laborioso, hay que tener en cuenta que las compañías fabricantes de herramientas utilizadas en la industria del petróleo, tiene como buena costumbre emplear en sus diseños sistemas que NO consuman corrientes totales superiores a 126mA, ya que estas herramientas a menudo, entran a funcionar en tándem con otras, junto con dispositivos de cañoneo, los cuales se activan en fondo con pulsos de corriente de 126mA, y se NO desea que se disparen en zonas incorrectas o que ocurran accidentes en superficie.

En consecuencia, esta fuente se diseñó con un circuito limitador de corriente para que la corriente de consumo no supere los 126mA, aun así esté la herramienta en total corto circuito, o que ocurran golpes al cable eléctrico mono conductor haciendo que este baje la impedancia a niveles críticos, aumentando el consumo de corriente, protegiendo así la caja de adquisición de superficie.

En la figura 29 se muestra la configuración del limitador de corriente, adjunto con el transistor mosfet de potencia IRF740, que es el encargado de regular el voltaje de salida de la fuente de alta, a un rango comprendido de 0 a 160

voltios de corriente continua a 126mA, con la ayuda VR1, el cual varía la conducción de este transistor, haciendo variar el voltaje de salida.

El diseño siguió las siguientes formulas:

$$VBE = VR1 - VR2$$

Para I_{cmax} ; $VR1 > VR2$

$$VBE = VR1 - VR2 = 0.7V$$

Resolviendo la malla se tiene:

$$VBE = R1 * IC - (VSal - R1 * IC) * \frac{R2}{R2 + R3}$$

Despejando IC :

$$IC = \frac{(R2 + R3)VBE + R2 * VSal}{R1 * R3}$$

En caso de corto circuito (ICC) el $VSal = 0$

$$ICC = \frac{VBE}{R1} * \left(1 * \frac{R2}{R3}\right)$$

Adicionalmente, se le agregó una resistencia en paralelo de 2.2kΩ y otra en serie de 1.2kΩ para así asegurar que nunca la salida de la fuente se ponga en corto, aun poniendo los extremos del cable eléctrico mono conductor unidos.

La fuente alta total con los condensadores que filtran el rizado, transistor mosfet de potencia, potenciómetro variable (VR1), limitador de corriente, voltímetro, amperímetro y resistencia de protección se detalla a continuación en la figura 30:

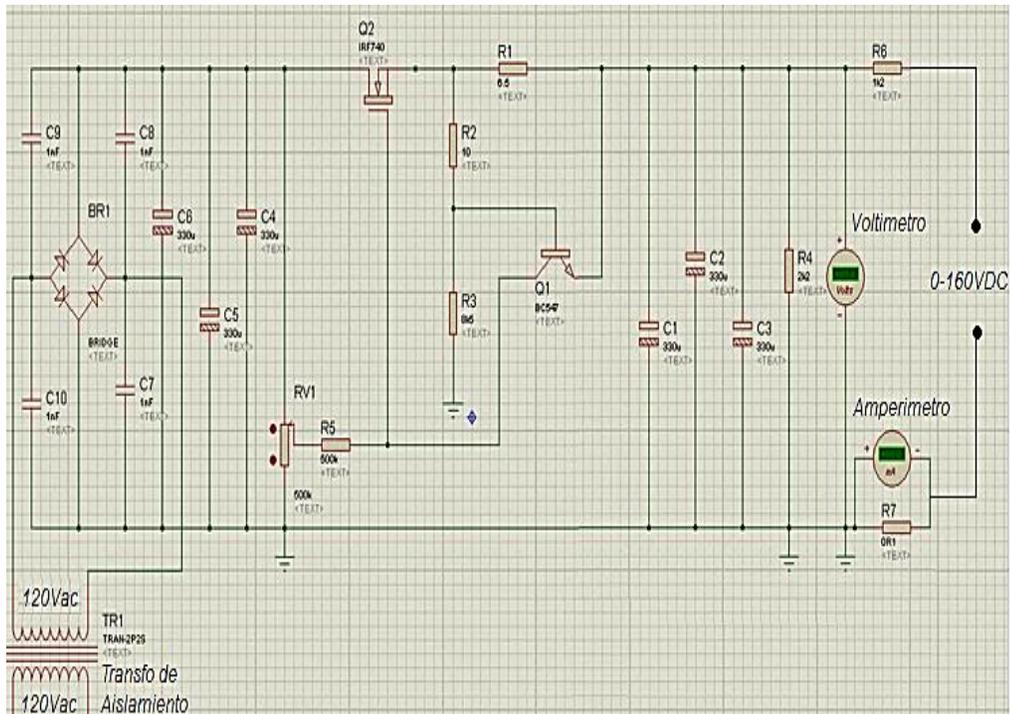


Figura 30: Fuente de alta completa

4.2 LCD Voltaje

Este LCD tiene el fin de mostrar el monitoreo del voltaje de salida que va dirigido a la herramienta de fondo, a través del cable eléctrico mono conductor, recordemos que es un voltaje variable que se extiende desde 0 voltios de corriente continua hasta 160 voltios a 126mA.

EL LCD es comercial, sin dificultad de adquirirlo en una tienda de electrónicos, muy fácil de operar, solo se conecta en paralelo con el dispositivo al cual se quiera medir su caída de tensión. Además está provisto de una reóstato tipo trimmer que sirve para ajustar la precisión de la medida, comparándola con un voltímetro previamente calibrado, que en este caso se utilizó el multímetro, en función de voltímetro marca FLUKE de la serie 115.



Figura 31: Voltímetro digital de panel

4.3 LCD corriente

EL LCD de corriente muestra el monitoreo de la corriente que consume la herramienta de fondo, la cual está limitada a 126mA. Aclarando por su puesto que la herramienta de fondo solo consume 40mA, pero la fuente de alimentación de la caja de adquisición, puede sostener a más una herramienta colocada en tándem.

Al igual que el LCD de voltaje, es de fácil operación, esta vez se coloca en serie a la carga que se está alimentando, y posee un reóstato para ajustar la precisión de la medida, comparándola con un amperímetro previamente calibrado, que al igual se utilizó el multímetro, en función de amperímetro marca FLUKE de la serie 115.



Figura 32: Amperímetro digital de panel

4.4 Acondicionador de señal (A):

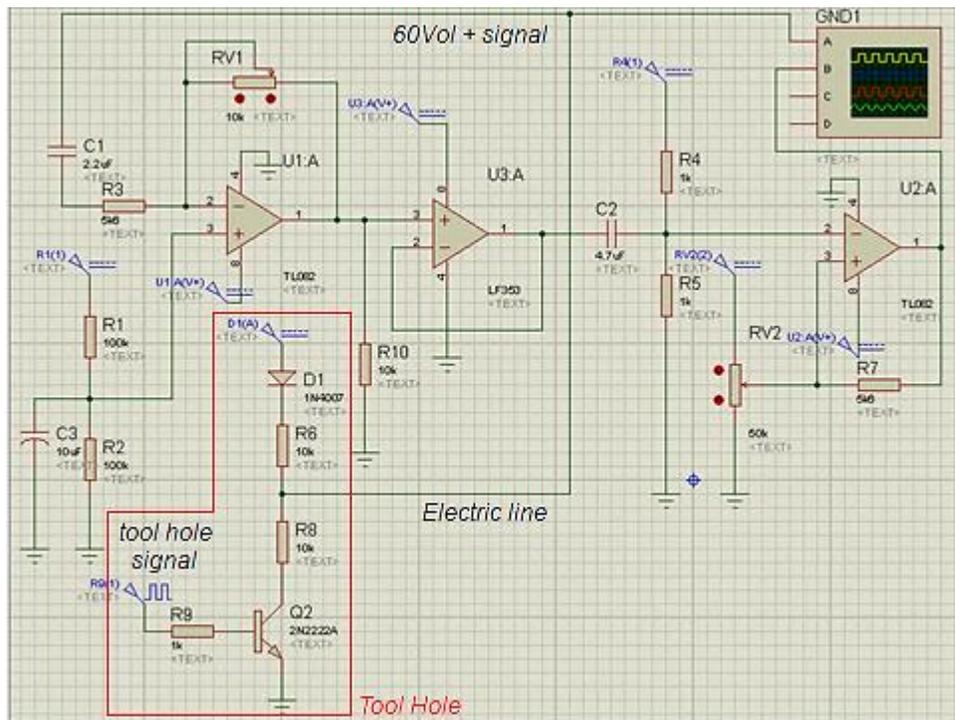


Figura 33: Acondicionador de señal

En la figura 33 Tool hole signal, es la señal que entrega el PIC ubicado en la herramienta de fondo, producida por la sensorica, la cual se introduce al cable eléctrico mono conductor (Electric line), através de R9, R8, R6, D1 y Q2 todos ubicados en el circuito impreso de la herramienta.

Una vez esta señal “montada” sobre los 60 voltios, se lleva a superficie hasta la caja de adquisición, donde se elimina la componente de DC por el condensador C1 de 2.2uF quedando la señal de interés.

El amplificador operacional escogido para esta aplicación es el TL 082, el cual tiene entadas a FET, produciendo cierta inmunidad al ruido.

Después que la señal está limpia de la componente DC llega al operacional U1 encargado de amplificarla y sumarle un nivel de 2.5 voltios, necesario ya que los voltajes con los que se alimenta todo el sistema son producidos por una fuente sencilla, contando solo con +5voltios.

La ganancia de esta etapa es ajustable a través de RV1, quedando definida así:

$$G = RV1/R3$$

La configuración de U3 es de un seguidor de tensión y tiene el propósito de efectuar un acople de impedancia, para asegurar que no halla atenuación de la señal. Por último la señal llega hasta el operacional U2, que busca saturarla para que quede bien definida.

Todo este acondicionamiento que sufre la señal, es vital, ya que la señal es afectada por la impedancia intrínseca del cable eléctrico mono conductor, extendido desde la herramienta fondo del pozo hasta la superficie llegando a la caja de adquisición, dejándola redondeada en las esquinas y con pedestal bajo, produciendo pérdida de información o mala interpretación por parte del PIC, de no ser acondicionada.

A continuación se muestra la señal que trae el cable eléctrico antes del acondicionamiento y la salida ya tratada. Se aclara, que el oscilograma en amarillo es la tensión de 60 voltios sumada con la señal de la herramienta de fondo y en azul es la señal limpia.

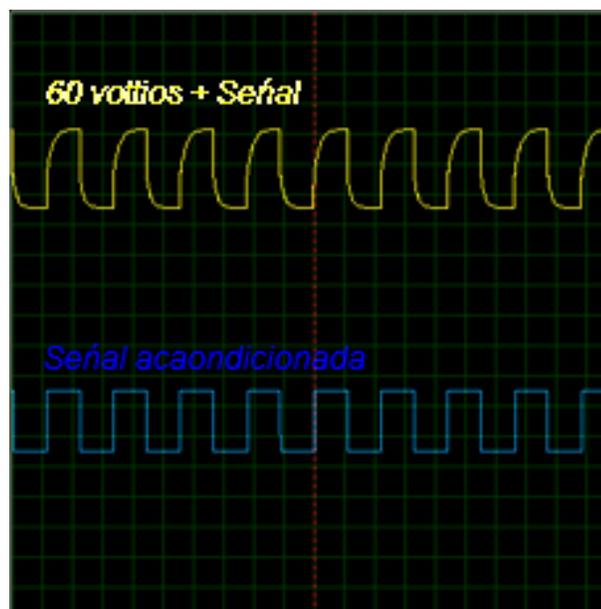


Figura 34: 60 voltios más señal y señal acondicionada

4.5 Encoder

En el capítulo 2, página 22 se habla de la MD (Measured Depth en inglés), es la profundidad medida desde la mesa rotaria o tubing hanger hasta el fondo donde se ubicará la herramienta Gyro, y en este punto se iniciará el survey sacándola a una velocidad baja aproximadamente 100 pies por minuto, haciendo estaciones cada 100 pies hasta llenar a superficie.

Para determinar la MD se logra a través de un dispositivo conocido como Encoder, que mide la longitud del cable eléctrico mono conductor que baja la herramienta, y esta longitud medida corresponde a la MD.

El movimiento del cable, sea descendente o ascendente se transmite al encoder por medio de un disco, que generalmente es de teflón, al cual se le conoce su longitud para determinar el avance en pies por cada vuelta.



Figura 35: Encoder utilizado Modelo XH20DB-37-SS-200

El encoder escogido para esta aplicación es el del tipo incremental óptico, que emplea el principio de exploración fotoeléctrica para detectar el movimiento angular. El sistema de lectura se basa en la rotación de un disco graduado con un reticulado radial formado por líneas opacas, alternadas con espacios transparentes. Este conjunto está iluminado de modo perpendicular por una fuente de rayos infrarrojos. El disco proyecta de este modo su

imagen sobre una superficie de varios receptores oportunamente enmascarados por otro reticulado que tiene el mismo paso del anterior llamado colimador. Los sensores tienen la tarea de detectar las variaciones de luz que se producen con el desplazamiento del disco convirtiéndolas en las correspondientes variaciones eléctricas.

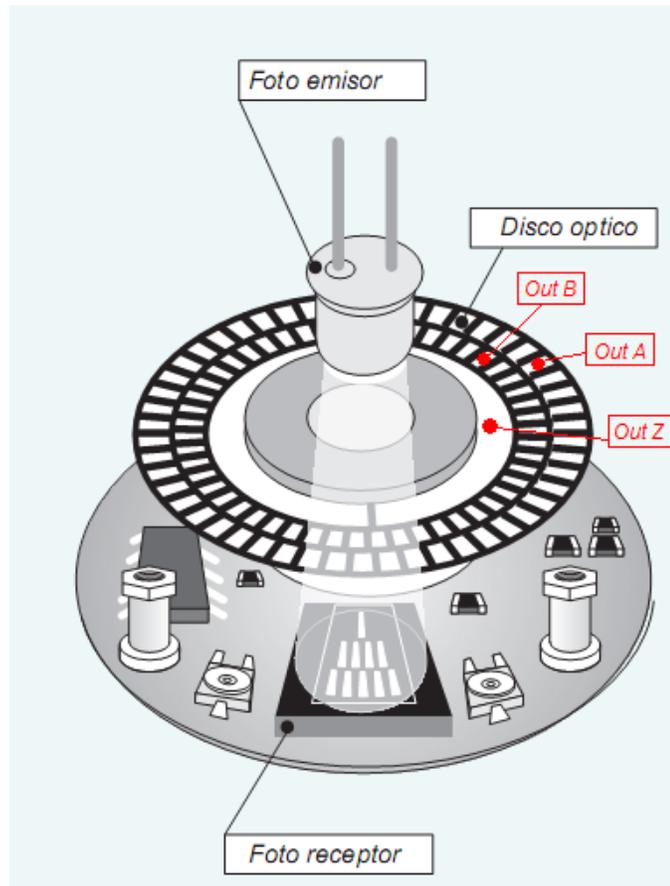


Figura 36: Componentes básicos de un Encoder óptico incremental. Tomado de pág 4 [19]

El encoder incremental óptico proporciona normalmente dos formas de ondas cuadradas y desfasadas entre sí en 90° eléctricos, los cuales por lo general son "canal A y "canal B". Con la lectura de un solo canal se dispone de la información correspondiente a la velocidad de rotación, mientras que si se capta también la señal "B" es posible discriminar el sentido de rotación en base a la secuencia de datos que producen ambas señales. Está disponible además otra señal llamado canal Z o cero, que proporciona la posición absoluta de cero del eje del encoder. Esta señal se presenta bajo forma de impulso cuadrado con fase y amplitud centrada en el canal A.

La unidad de medida para definir la precisión de un encoder es el grado eléctrico, éste determina la división de un impulso generado por el encoder: en efecto, los 360° eléctricos corresponden a la rotación mecánica del eje, necesaria para hacer que se realice un ciclo o impulso completo de la señal de salida. Para hallar la equivalencia de grados mecánicos a 360 grados eléctricos es suficiente aplicar esta fórmula:

$$360^\circ \text{ eléctricos} = \frac{360^\circ \text{ mecánicos}}{\text{No. impulsos por giro (PPR)}}$$

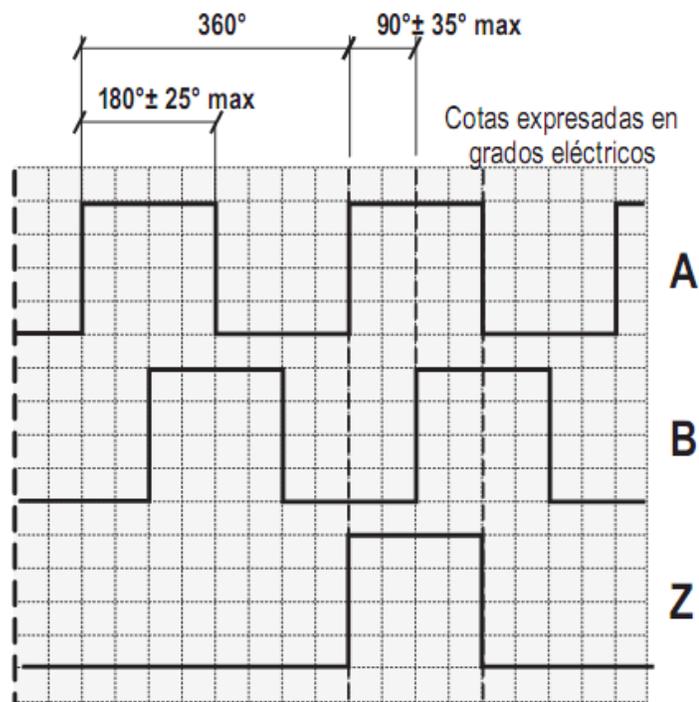
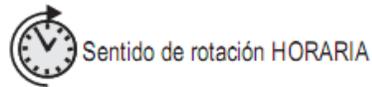


Figura 37: Salidas generadas por el encoder incremental óptico. Tomado de pág 7 [19]

Así de esta forma se puede definir un encoder por la cantidad de pulsos por revolución (PPR), es decir cuántos pulsos se obtiene a la salida por el canal “A” si a este se le induce una vuelta completa. Como existe gran variedad de encoder con diferente PPR, el software que se diseñó en el computador del usuario se implementó una pestaña para poder introducir las PPR específicas para un encoder determinado, siendo amigable al poderse utilizar el sistema con diferentes encoders. Las PPR son dadas por el fabricante en el data sheet.

4.6 Detector de fase

Por medio de un detector de fase, podemos determinar el sentido del cable, si entra o sale del pozo.

Al tener el canal B desfasado 90° respecto al canal A, (ver figura 37) y con unas pocas líneas de código se puede saber si el tambor que embobina el cable está sacando la herramienta del pozo, o si por el contrario la está introduciendo al fondo del pozo.

El proceso lógico que se siguió fue el siguiente:

Supongamos un encoder de 200 PPR. Las señales a lo largo del tiempo que vamos a obtener por los canales A y B serán las siguientes:

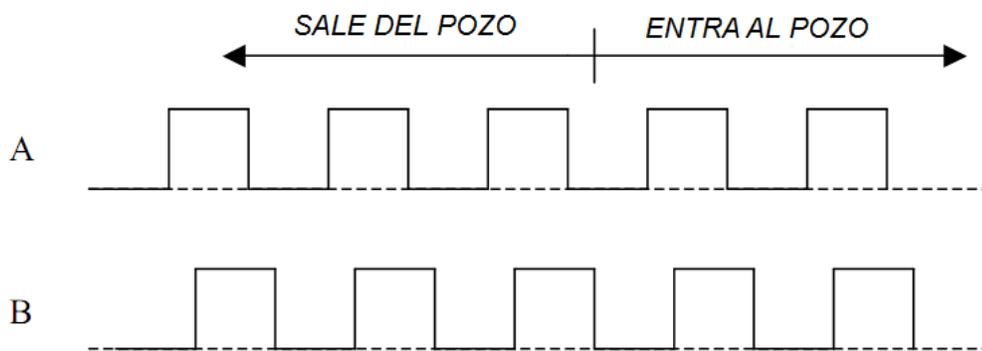


Figura 38: Señales A y B para determinar la dirección de la herramienta

En cada revolución completa del encoder podremos contar 200 pulsos, con un flanco de subida (transición de 0 a 1) y un flanco de bajada (transición 1 a 0) cada uno. Para determinar el sentido girado por el encoder se cuenta el número de flancos de subida (o de bajada) generados por un canal (en este caso el A) y la dirección vendrá de terminada, en cada pulso, por el estado del otro canal, de tal forma que si está en 0 determinamos que va en una dirección (metiendo la herramienta al pozo, por ejemplo) y si es 1 irá en la dirección contraria.

Para facilitar el asunto, solo se tuvo en cuenta los flancos de subida del canal A.

Si tenemos flanco de subida en A se tiene estos dos casos según el estado de B:

- Si B = 0 Desplazamos un paso a la Derecha (se está metiendo la herramienta)
- Si B = 1 Desplazamos un paso a la Izquierda (se está sacando la herramienta)

Como vamos a conectar el encoder XH20DB-37 –SS -200 al micro controlador PIC16F876:

Canal A: Este canal es utilizado para contar el número de pulsos. Para obtener el rendimiento óptimo del encoder, lo conecto a una línea que pueda generar una interrupción en cada flanco de subida. Se usa el RB5.

Canal B: Sirve para determinar la dirección de giro. Se usa el RB4

4.7 Conversor I/V, Sensor de peso y Conversor A/D

Los camiones de registro tiene una celda de carga (sensor de peso) cuya salida es de 4 – 20ma para determinar el peso de la sarta que introduce al pozo, y por medio de este dato se puede suponer que está pasando en fondo, es decir, si la sarta está bajando con un peso el cual va aumentando lentamente (es de entender que a medida que se introduce la herramienta el peso aumenta porque la cantidad de cable eléctrico también aumenta) y de repente disminuye, el operador supone que la sarta se atascó en algún cuello de la tubería, descansando el peso con el que venía bajando en la obstrucción.



Figura 39: Camión de registro de electric line

Si por el contrario, el tambor del camión de registro va envolviendo el cable eléctrico, el peso debe mantenerse constante o ir disminuyendo lentamente hasta llegar a un peso determinado (debe pesar como mínimo el peso de la sarta), y si de repente el peso aumenta, el operador entiende que la sarta se atascó en un punto y que si sigue jalando le cable se puede romper e irse toda la sarta en fondo. (Esta es la pesadilla de todo operador).

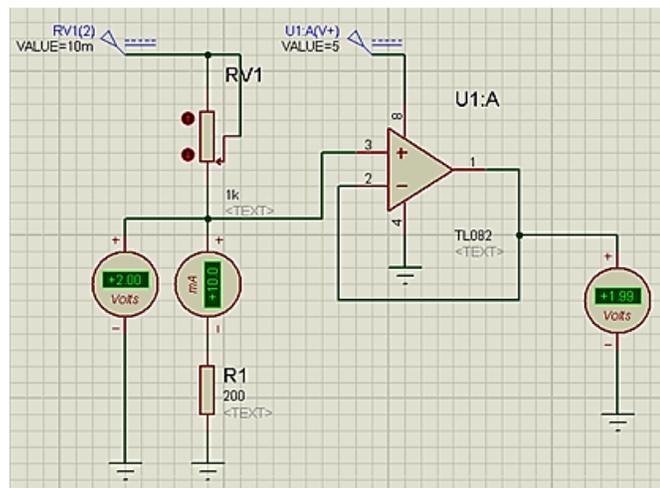


Figura 40: Conversor I/V

Para este SISTEMA DE MONITOREO Y REGISTRO DE DATOS EN TIEMPO REAL DE AZIMUT Y ANGULO DE INCLINACIÓN EN POZOS DESVIADOS Y VERTICALES, no es importante conocer el peso de la sarta, ya que este dato no se aplica para conocer la trayectoria del pozo.

El bloque de Conversor I/V que se implementó (Figura 40) en la board de sistema de adquisición de datos de superficie, se hizo el código de software del conversor A/D pero no se implementó como tal en el hardware

4.8 USART

El micro controlador utilizado el PIC16f876, cuenta con módulo de comunicación serie: el USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter), que puede funcionar en forma síncrona (half dúplex) o asíncrona (full duplex). En esta aplicación el pic va a transmitir los datos al computador del usuario, en el cual se realizará el procesamiento real de la información adquirida por la herramienta de fondo y la longitud del cable eléctrico mono conductor que mide el encoder, y al mismo tiempo desde el computador del usuario se puede setear la profundidad del pozo, los Pulsos Por Revolución del encoder, las propiedades de la polea, entre otros, y por tanto la comunicación debe ser asíncrona full dúplex.

En la comunicación asíncrona bidireccional (Full Duplex) se utiliza los pines RC6/TX/CK para la transmisión de salida y el pin RC7/RX/CK para la recepción de entrada, los datos enviados tienen tamaño de byte y en el formato de la trama se añade un bit de Start = 0 y un bit de Stop = 1, y se puede añadir un noveno bit de datos (ejemplo bit de paridad) a los 8 bits del dato:



Figura 41: Distribución de los bits en el módulo USART

La forma de comunicación serie usa la norma RS-232 / RS-485, transmitiendo los bits a una frecuencia fija y normalizada.

Los bloques que configura la USART en modo asíncrono son:

- Circuito de muestreo
- Generador de baudios
- Transmisor asíncrono
- Receptor asíncrono

En modo asíncrono la USART se para al entrar el micro en modo SLLEEP.

Generador de Baudios

Para generar la velocidad de transmisión existe un temporizador dedicado de 8 bits (BRG), con funcionamiento dedicado para la USART.

El registro SPBRG controla la velocidad en baudios y se rige con las siguientes fórmulas:

Tabla 6
Calculo de los baudios

| SYNC | BRGH = 0 (Low Speed) | BRGH = 1 (High Speed) |
|------|--|---------------------------------|
| 0 | (Asynchronous) Baud Rate = $F_{osc}/(64(X+1))$ | Baud Rate = $F_{osc}/(16(X+1))$ |
| 1 | (Synchronous) Baud Rate = $F_{osc}/(4(X+1))$ | N/A |

X = value in SPBRG (0 to 255)

Tabla 7
Registros asociados con la generación de los baudios

| Address | Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 | Value on: POR, BOR | Value on all other RESETS |
|---------|-------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|---------------------------------|
| 98h | TXSTA | CSRC | TX9 | TXEN | SYNC | — | BRGH | TRMT | TX9D | 0000 -010 | 0000 -010 |
| 18h | RCSTA | SPEN | RX9 | SREN | CREN | ADDEN | FERR | OERR | RX9D | 0000 000x | 0000 000x |
| 99h | SPBRG | Baud Rate Generator Register | | | | | | | | 0000 0000 | 0000 0000 |

Legend: x = unknown, - = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by the BRG.

Tabla 8
Baudios modo asíncrono con (BRGH = 0)

| BAUD RATE (K) | Fosc = 20 MHz | | | Fosc = 16 MHz | | | Fosc = 10 MHz | | |
|---------------|---------------|---------|-----------------------|---------------|---------|-----------------------|---------------|---------|-----------------------|
| | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) |
| 0.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1.2 | 1.221 | 1.75 | 255 | 1.202 | 0.17 | 207 | 1.202 | 0.17 | 129 |
| 2.4 | 2.404 | 0.17 | 129 | 2.404 | 0.17 | 103 | 2.404 | 0.17 | 64 |
| 9.6 | 9.766 | 1.73 | 31 | 9.615 | 0.16 | 25 | 9.766 | 1.73 | 15 |
| 19.2 | 19.531 | 1.72 | 15 | 19.231 | 0.16 | 12 | 19.531 | 1.72 | 7 |
| 28.8 | 31.250 | 8.51 | 9 | 27.778 | 3.55 | 8 | 31.250 | 8.51 | 4 |
| 33.6 | 34.722 | 3.34 | 8 | 35.714 | 6.29 | 6 | 31.250 | 6.99 | 4 |
| 57.6 | 62.500 | 8.51 | 4 | 62.500 | 8.51 | 3 | 52.083 | 9.58 | 2 |
| HIGH | 1.221 | - | 255 | 0.977 | - | 255 | 0.610 | - | 255 |
| LOW | 312.500 | - | 0 | 250.000 | - | 0 | 156.250 | - | 0 |

| BAUD RATE (K) | Fosc = 4 MHz | | | Fosc = 3.6864 MHz | | |
|---------------|--------------|---------|-----------------------|-------------------|---------|-----------------------|
| | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) |
| 0.3 | 0.300 | 0 | 207 | 0.3 | 0 | 191 |
| 1.2 | 1.202 | 0.17 | 51 | 1.2 | 0 | 47 |
| 2.4 | 2.404 | 0.17 | 25 | 2.4 | 0 | 23 |
| 9.6 | 8.929 | 6.99 | 6 | 9.6 | 0 | 5 |
| 19.2 | 20.833 | 8.51 | 2 | 19.2 | 0 | 2 |
| 28.8 | 31.250 | 8.51 | 1 | 28.8 | 0 | 1 |
| 33.6 | - | - | - | - | - | - |
| 57.6 | 62.500 | 8.51 | 0 | 57.6 | 0 | 0 |
| HIGH | 0.244 | - | 255 | 0.225 | - | 255 |
| LOW | 62.500 | - | 0 | 57.6 | - | 0 |

Tabla 9
Baudios modo asíncrono con (BRGH = 1)

| BAUD RATE (K) | Fosc = 20 MHz | | | Fosc = 16 MHz | | | Fosc = 10 MHz | | |
|---------------|---------------|---------|-----------------------|---------------|---------|-----------------------|---------------|---------|-----------------------|
| | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) |
| 0.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1.2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2.4 | - | - | - | - | - | - | 2.441 | 1.71 | 255 |
| 9.6 | 9.615 | 0.16 | 129 | 9.615 | 0.16 | 103 | 9.615 | 0.16 | 64 |
| 19.2 | 19.231 | 0.16 | 64 | 19.231 | 0.16 | 51 | 19.531 | 1.72 | 31 |
| 28.8 | 29.070 | 0.94 | 42 | 29.412 | 2.13 | 33 | 28.409 | 1.36 | 21 |
| 33.6 | 33.784 | 0.55 | 36 | 33.333 | 0.79 | 29 | 32.895 | 2.10 | 18 |
| 57.6 | 59.524 | 3.34 | 20 | 58.824 | 2.13 | 16 | 56.818 | 1.36 | 10 |
| HIGH | 4.883 | - | 255 | 3.906 | - | 255 | 2.441 | - | 255 |
| LOW | 1250.000 | - | 0 | 1000.000 | - | 0 | 625.000 | - | 0 |

| BAUD RATE (K) | Fosc = 4 MHz | | | Fosc = 3.6864 MHz | | |
|---------------|--------------|---------|-----------------------|-------------------|---------|-----------------------|
| | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) | KBAUD | % ERROR | SPBRG value (decimal) |
| 0.3 | - | - | - | - | - | - |
| 1.2 | 1.202 | 0.17 | 207 | 1.2 | 0 | 191 |
| 2.4 | 2.404 | 0.17 | 103 | 2.4 | 0 | 95 |
| 9.6 | 9.615 | 0.16 | 25 | 9.6 | 0 | 23 |
| 19.2 | 19.231 | 0.16 | 12 | 19.2 | 0 | 11 |
| 28.8 | 27.798 | 3.55 | 8 | 28.8 | 0 | 7 |
| 33.6 | 35.714 | 6.29 | 6 | 32.9 | 2.04 | 6 |
| 57.6 | 62.500 | 8.51 | 3 | 57.6 | 0 | 3 |
| HIGH | 0.977 | - | 255 | 0.9 | - | 255 |
| LOW | 250.000 | - | 0 | 230.4 | - | 0 |

Transmisor asíncrono

El transmisor asíncrono se habilita mediante el bit TXEN, TXSTA (5). Para transmitir un dato el software lo escribe en el registro TXREG, luego paso el dato al registro de desplazamiento TRS, este registro no se carga hasta que el bit de SOP del dato anterior no se ha transmitido.

Al quedar vacío el TXREG se activa el bit de interrupción TXIF (PIR1(4)), habilitado por el bit TXIE (PIE(4)). TXIF no se desactiva por software, se desactiva sólo cuando se cargan nuevos datos.

El bit TRMT, TXSTA(1) que muestra el estado del TSR, no produce ninguna interrupción. (cuando activa TRMT está vacío).

Para enviar un dato con 9 bits hay que habilitar el TX9, (TXSTA(6)) y poner el que se quiere enviar en TX9D (TXSTA(0)).

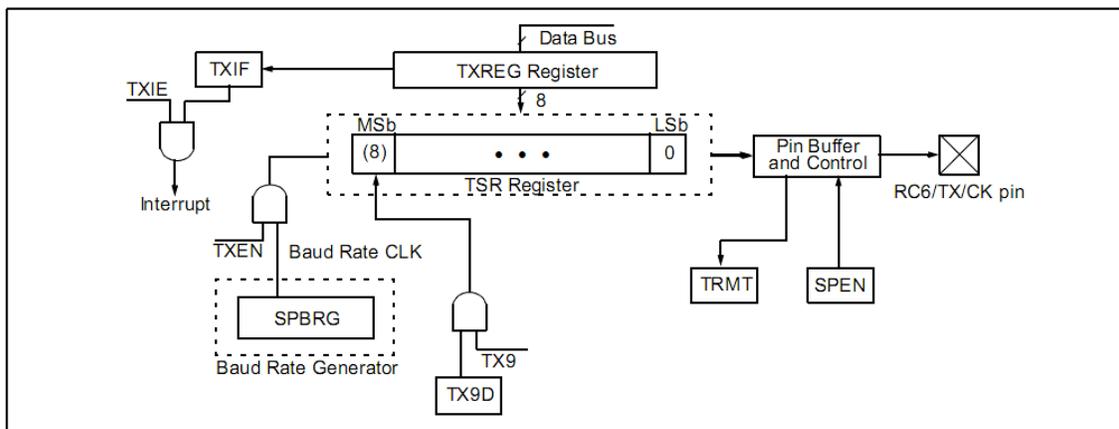


Figura 42: Diagrama de bloques del transmisor USART

Registro: TXSTA: Transmit status and control register (ADDRESS 98h)

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-----|-------|------|-------|
| R/W-0 | R/W-0 | R/W-0 | R/W-0 | U-0 | R/W-0 | R-1 | R/W-0 |
| CSRC | TX9 | TXEN | SYNC | — | BRGH | TRMT | TX9D |
| bit 7 | | | | | | | bit 0 |

bit 7 CSRC: Selección de la fuente de la señal de reloj
Modo asíncrono:
 No importa
Modo síncrono:
 1 = Modo maestro (reloj generado internamente por BRG)
 0 = Modo esclavo (reloj generado externamente)

bit 6 TX9: Habilitación transmisión del 9-bit
 1 = Selección transmisión 9-bit
 0 = Selección transmisión 8-bit

- bit 5 TXEN: Habilita transmisión
1 = Transmisión anabled
0 = Transimisión disabled
Nota: SREN/CREN sobrescribe TXEN en modo SYNC.
- bit 4 SYNC: Selección del modo USART
1 = Modo síncrono
0 = Modo asíncrono
- bit 3 No implementado: Se lee como '0'
- bit 2 BRGH: Selección de velocidad.
Modo asíncrono:
1 = Velocidad alta
0 = Velocidad baja
Modo síncrono:
No se utiliza este modo.
- bit 1 TRMT: Bit de estado del registro de desplazamiento de transmisión.
1 = TSR vacío
0 = TSR lleno
- bit 0 TX9D: 9th bit de transmisión, puede ser de paridad

Estos son los pasos a seguir para implementar la transmisión en USART:

1. Configurar RC6/TX/CK como salida y RC7/RX/DT como entrada
2. Poner SYNC=0 y SPEN=1, USART en modo asíncrono
3. Si se desea activar interrupciones activar TXIE=1.
4. Si el dato es de 9 bit TX9=1 y cargar TX9D
5. Cargar X (valor de 0 a 255) en SPBRG, y elegir BRCH para controlar la frecuencia de trabajo.
6. Activar la transmisión TXEN=1,
7. Cargar en TXREG el dato a transmitir.

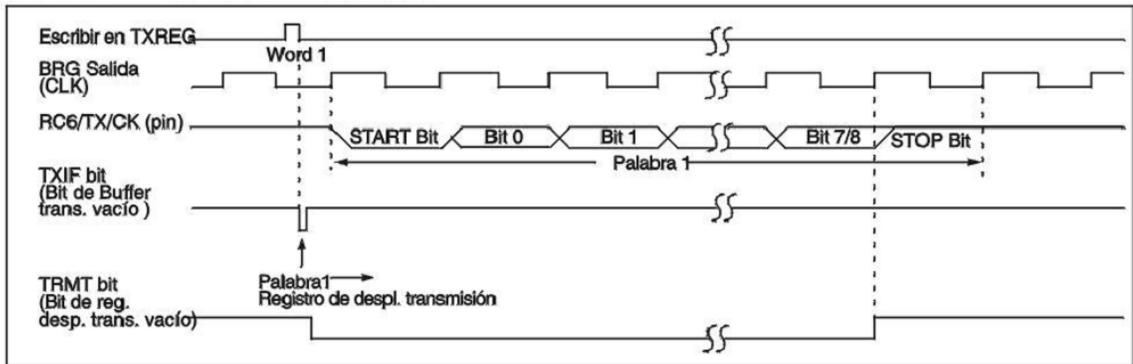


Figura 43: Transmisión asíncrona

Receptor asíncrono

La recepción se habilita mediante el bit CREN, (RCTA(4)), entrando los datos por el pin RC7/RX/DT, llegan hasta el muestreo y se carga en el registro de desplazamiento RSR de forma serie.

Al recibir el bit de STOP, el dato contenido en RSR pasa al registro RCREG si está vacío, y se activa el bit de interrupción RCIF, (PIR1(5)). Habilitada mediante el bit RCIE (PIE1(5)). RCIF es de sólo lectura y se desactiva por hardware al leer RCREG.

El registro RCREG admite dos datos a la espera de ser leídos. Formando un FIFO de dos niveles. Si se reciben tres datos sin que RCREG se lea, el último se pierde. Se reduce un error de sobre escritura y hay que reiniciar el receptor. El bit de sobre escritura OERR(RCSTA(1)), se desactiva reseteando el receptor. CREN=0.

El error de encuadre FERR, (RCSTA(2)) se produce si el bit de STOP es un cero. El 9th bit y FERR se cargan a la vez que RCREG, al leer el último dato de RCREG por lo tanto siempre hay que leer el 9th bit y FERR antes de leer RCREG.

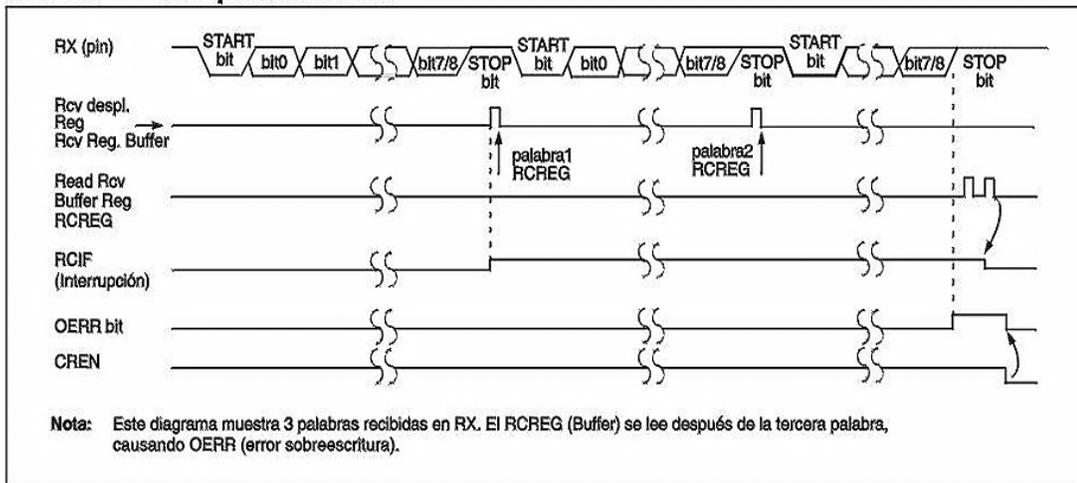


Figura 45: Recepción asíncrona

Registro: RCSTA: Receive status and control register (ADDRESS 18h)

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| R/W-0 | R/W-0 | R/W-0 | R/W-0 | R/W-0 | R-0 | R-0 | R-x |
| SPEN | RX9 | SREN | CREN | ADDEN | FERR | OERR | RX9D |
| bit 7 | | | | bit 0 | | | |

- bit 7 SPEN: Habilita el puerto serie
 1 = Habilita el puerto serie (configura RC//RX/DT y RC6/TX/CK como pines del puerto serie)
 0 = Deshabilitado
- bit 6 RX9: Habilita la recepción del bit 9th.
 1 = Selecciona la recepción con 9-bit
 0 = Selecciona la recepción con 8-bit
- bit5 SREN: Habilita la recepción sencilla
Modo asíncrono:
 No influye
Modo síncrono:
 Este bit se desactiva después de la recepción
Modo asíncrono-esclavo:
 No influye
- bit 4 CREN: Habilita la recepción continua
Modo asíncrono:
 1 = Habilita la recepción continua
 0 = Deshabilita la recepción continua

- bit 3 ADDEN: Habilita la detección de la dirección
Modo asíncrono con 9-bit (RX9 = 1):
 1 = Habilita la detección de la dirección, sólo recibe el dato y produce interrupción de recepción cuando RSR<8> está activo.
 0 = Deshabilita la detección de dirección, se reciben todos los bytes, y 9th bit puede usarse para paridad.
- bit 2 FERR: Error de encuadre
 1 = Error de encuadre (puede actualizarse leyendo RCREG y recibiendo el próximo byte vacío.
 0 = No hay error de encuadre
- bit 1 OERR: Error de sobre escritura
 1 = Error de sobre escritura (puede ser borrado escribiendo un cero en CREN)
 0 = No hay error de sobre escritura
- bit 0 RX9D: 9th bit del dato recibido (la paridad debe ser calculada por el software de usuario)

Tabla 10:
 Registro asociados con la recepción asíncrona

| Address | Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 | Valor en: POR, BOR | Valor en otros RESETS |
|-------------------------|--------|----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------------------------|-----------------------------|
| 0Bh, 8Bh, 10Bh, 18Bh | INTCON | GIE | PEIE | TOIE | INTE | RBIE | TOIF | INTF | ROIF | 0000 000x | 0000 000u |
| 0Ch | PIR1 | PSPIF ⁽¹⁾ | ADIF | RCIF | TXIF | SSPIF | CCP1IF | TMR2IF | TMR1IF | 0000 0000 | 0000 0000 |
| 18h | RCSTA | SPEN | RX9 | SREN | CREN | — | FERR | OERR | RX9D | 0000 -00x | 0000 -00x |
| 1Ah | RCREG | USART Recepción | | | | | | | | 0000 0000 | 0000 0000 |
| 8Ch | PIE1 | PSPIE ⁽¹⁾ | ADIE | RCIE | TXIE | SSPIE | CCP1IE | TMR2IE | TMR1IE | 0000 0000 | 0000 0000 |
| 98h | TXSTA | CSRC | TX9 | TXEN | SYNC | — | BRGH | TRMT | TX9D | 0000 -010 | 0000 -010 |
| 99h | SPBRG | Baudios | | | | | | | | 0000 0000 | 0000 0000 |

4.9 Conversor Serial/USB

Anteriormente se comentó que este bloque no hubo la necesidad de diseñarlo, por conveniencia se compró en un almacén experto en comercializar equipos electrónicos por unos pocos miles de pesos.

Este convertor se acomodó muy bien a mis exigencias, cumpliendo el objetivo de establecer el puente de comunicación entre la salida USART (previamente RS232) del PIC16F876A y la entrada USB del computador del Usuario, donde está en sí el software que realiza los cálculos pertinentes, siguiendo el modelo de mínima curvatura para determinar el ángulo de azimut e inclinación y establecer la trayectoria del pozo en cuestión.

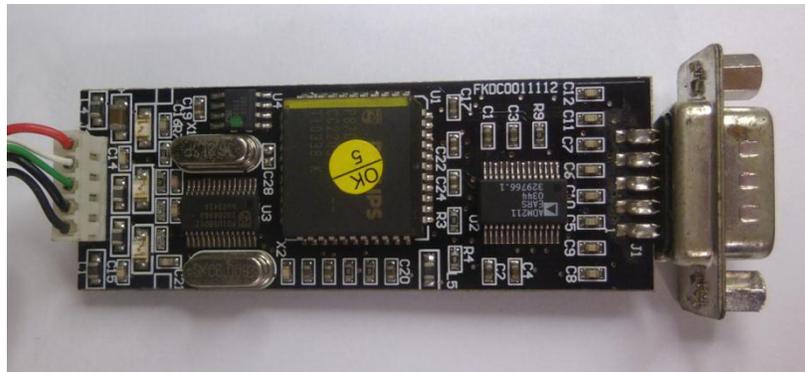


Figura 46: Conversor USART a USB

4.10 Línea

La línea es un cable eléctrico mono conductor con diámetro de 7/32” o 5.69mm por el cual puede circular un máximo de 1200 VDC, cuyo conductor de cobre interno es de AWG 16 y una impedancia 4.1Ohmios por cada 1000 pies, su resistencia de aislamiento mínima de 457 Megohmios por kilómetro a 500 VDC y de fabricación CAMESA.

Las unidades de registro regularmente están equipadas con este tipo de cable, que además de energizar la herramienta, lleva y trae datos desde el fondo hasta la superficie y sirve para bajar y sacar la herramienta de fondo. En la figura 47 se muestra un carrete que contiene enrollado el cable eléctrico de una unidad de electric line.



Figura 47: Carrete de cable 7/32 y 9/32 de unidad de registro

4.11 SOFTWARE DEL COMPUTADOR DE USUARIO.

En el computador de Usuario se instaló el software que se necesita para procesar la data recogida por la Herramienta de Fondo y enviada por la Interfaz de Comunicación.

Este Software se diseñó para que sea un sistema amigable con el usuario y de fácil manejo.

A continuación plasmó el software realizado en lenguaje C con el compilador de CCS.

////////////////////////////////////

//-----

#ifndef Unit1H

#define Unit1H

//-----

#include <Classes.hpp>

#include <Controls.hpp>

#include <StdCtrls.hpp>

#include <Forms.hpp>

#include <ExtCtrls.hpp>

#include <jpeg.hpp>

#include <OleCtrls.hpp>

#include "GIFImage.hpp"

//-----

```

class TForm1 : public TForm
{
__published: // IDE-managed Components
    TTimer *Timer1;
    TImage *Image1;
    void __fastcall Timer1Timer(TObject *Sender);
    void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);
private: // User declarations
public: // User declarations
    __fastcall TForm1(TComponent* Owner);
};
//-----
extern PACKAGE TForm1 *Form1;
//-----
#endif
//-----

#ifdef Unit2H
//-----
#include <Classes.hpp>
#include <Controls.hpp>
#include <StdCtrls.hpp>
#include <Forms.hpp>
#include <Buttons.hpp>
#include <Grids.hpp>
#include <ValEdit.hpp>
#include "CPort.hpp"
#include <Chart.hpp>
#include <ComCtrls.hpp>
#include <DB.hpp>
#include <DBChart.hpp>
#include <DBGrids.hpp>
#include <DBTables.hpp>
#include <Dialogs.hpp>
#include <ExtCtrls.hpp>
#include <Series.hpp>
#include <TeEngine.hpp>
#include <TeeProcs.hpp>
#include "CPortCtl.hpp"
#include "TeePoin3.hpp"
#include "TeeSurfa.hpp"
#include "TeeTools.hpp"
#include "TeeEdit.hpp"
#include <QRCtrls.hpp>
#include <QuickRpt.hpp>
#include <ExtDlgs.hpp>
#include <jpeg.hpp>
#include <QrTee.hpp>
//#include "grimgctrl.h"
#include <QREditor.hpp>
#include "qrpdffilt.hpp"
#include "QRPDFFilt.hpp"

```

```

#include "GIFImage.hpp"
//-----
class TForm2 : public TForm
{
__published: // IDE-managed Components
    TSaveDialog *SaveDialog1;
    TTable *Table2;
    TDataSource *DataSource2;
    TTable *Table1;
    TDataSource *DataSource1;
    TLabel *Label4;
    TPageControl *PageControl1;
    TTabSheet *TabSheet1;
    TLabel *Label1;
    TTabSheet *TabSheet2;
    TGroupBox *GroupBox1;
    TLabel *Label6;
    TLabel *Label7;
    TLabel *Label8;
    TLabel *Label9;
    TLabel *Label10;
    TLabel *Label11;
    TGroupBox *GroupBox2;
    TLabel *Label12;
    TLabel *Label13;
    TLabel *Label14;
    TEdit *Edit1;
    TEdit *Edit2;
    TEdit *Edit3;
    TTabSheet *TabSheet3;
    TBevel *Bevel2;
    TLabel *Label2;
    TBevel *Bevel1;
    TLabel *Label3;
    TShape *Shape1;
    TButton *Button_Open;
    TTabSheet *TabSheet4;
    TDBChart *DBChart1;
    TTabSheet *TabSheet5;
    TLabel *Label5;
    TBevel *Bevel3;
    TLabel *Label15;
    TEdit *Edit5;
    TLabel *Label16;
    TLabel *Label17;
    TLabel *Label19;
    TBevel *Bevel4;
    TLabel *Label20;
    TBevel *Bevel5;
    TLabel *Label21;
    TLabel *Label22;
    TPoint3DSeries *Series1;
    TRotateTool *ChartTool1;

```

*TBitBtn *BitBtn1;*
*TChartEditor *ChartEditor1;*
*TEdit *Edit4;*
*TLabel *Label18;*
*TLabel *Label23;*
*TLabel *Label24;*
*TLabel *Label25;*
*TLabel *Label26;*
*TLabel *Label27;*
*TLabel *Label28;*
*TRadioGroup *RadioGroup1;*
*TRadioButton *RadioButton1;*
*TRadioButton *RadioButton2;*
*TRadioButton *RadioButton3;*
*TDBGrid *DBGrid2;*
*TBitBtn *BitBtn2;*
*TRadioButton *RadioButton4;*
*TRadioButton *RadioButton5;*
*TRadioButton *RadioButton6;*
*TTabSheet *TabSheet6;*
*TTabSheet *TabSheet7;*
*TLabel *Label29;*
*TLabel *Label30;*
*TLabel *Label31;*
*TLabel *Label32;*
*TLabel *Label33;*
*TLabel *Label34;*
*TLabel *Label35;*
*TLabel *Label36;*
*TLabel *Label37;*
*TImage *Image1;*
*TOpenPictureDialog *OpenPictureDialog1;*
*TEdit *Edit6;*
*TEdit *Edit7;*
*TEdit *Edit8;*
*TEdit *Edit9;*
*TEdit *Edit10;*
*TEdit *Edit11;*
*TEdit *Edit12;*
*TEdit *Edit13;*
*TEdit *Edit14;*
*TEdit *Edit15;*
*TEdit *Edit16;*
*TEdit *Edit17;*
*TEdit *Edit18;*
*TEdit *Edit19;*
*TEdit *Edit20;*
*TEdit *Edit21;*
*TBevel *Bevel7;*
*TBevel *Bevel8;*
*TBevel *Bevel9;*
*TBevel *Bevel6;*
*TBevel *Bevel10;*

*TBevel *Bevel11;*
*TBevel *Bevel12;*
*TComPort *ComPort;*
*TLabel *Label38;*
*TLabel *Label39;*
*TComComboBox *ComComboBox1;*
*TComComboBox *ComComboBox2;*
*TComComboBox *ComComboBox3;*
*TComComboBox *ComComboBox4;*
*TComComboBox *ComComboBox5;*
*TComComboBox *ComComboBox6;*
*TTimer *Timer1;*
*TBitBtn *BitBtn5;*
*TCheckBox *CheckBox1;*
*TQuickRep *QuickRep1;*
*TQRBand *QRBand1;*
*TQRLabel *QRLabel1;*
*TBitBtn *BitBtn6;*
*TBitBtn *BitBtn7;*
*TQRLabel *QRLabel2;*
*TQRLabel *QRLabel3;*
*TQRLabel *QRLabel4;*
*TQRLabel *QRLabel5;*
*TQRLabel *QRLabel6;*
*TQRLabel *QRLabel7;*
*TQRLabel *QRLabel8;*
*TQRLabel *QRLabel9;*
*TQRLabel *QRLabel10;*
*TOpenDialog *OpenDialog1;*
*TQRBand *ColumnHeaderBand1;*
*TQRBand *DetailBand1;*
*TQRBand *SummaryBand1;*
*TQRLabel *QRLabel12;*
*TQRDBText *QRDBText2;*
*TQRLabel *QRLabel11;*
*TQRLabel *QRLabel13;*
*TQRLabel *QRLabel16;*
*TQRLabel *QRLabel17;*
*TQRLabel *QRLabel18;*
*TQRLabel *QRLabel19;*
*TQRLabel *QRLabel20;*
*TQRLabel *QRLabel21;*
*TQRLabel *QRLabel22;*
*TQRLabel *QRLabel23;*
*TQRDBText *QRDBText1;*
*TQRDBText *QRDBText3;*
*TQRDBText *QRDBText4;*
*TQRDBText *QRDBText5;*
*TQRDBText *QRDBText6;*
*TQRDBText *QRDBText7;*
*TQRDBText *QRDBText8;*
*TQRDBText *QRDBText9;*
*TQRDBChart *QRDBChart1;*

```

TBevel *Bevel13;
TBevel *Bevel14;
TLabel *Label48;
TLabel *Label49;
TLabel *Label51;
TBitBtn *BitBtn15;
TOpenDialog *OpenDialog2;
TSaveDialog *SaveDialog2;
TLabel *Label40;
TLabel *Label53;
TLabel *Label54;
TLabel *Label55;
TBitBtn *BitBtn8;
TBitBtn *BitBtn3;
TBitBtn *BitBtn16;
TImage *Image2;
TImage *Image3;
TCheckBox *CheckBox2;
TCheckBox *CheckBox3;
TCheckBox *CheckBox4;
TCheckBox *CheckBox5;
TCheckBox *CheckBox6;
TCheckBox *CheckBox7;
TCheckBox *CheckBox8;
TLabel *Label56;
TLabel *Label57;
TCheckBox *CheckBox9;
    void __fastcall BitBtn3Click(TObject *Sender);
void __fastcall Button_OpenClick(TObject *Sender);
void __fastcall BitBtn4Click(TObject *Sender);
void __fastcall FormClose(TObject *Sender, TCloseAction &Action);
void __fastcall BitBtn1Click(TObject *Sender);
void __fastcall Image1Click(TObject *Sender);
void __fastcall PageControl1Change(TObject *Sender);
void __fastcall ComPortRxChar(TObject *Sender, int Count);
void __fastcall TabSheet2Exit(TObject *Sender);
void __fastcall Timer1Timer(TObject *Sender);
void __fastcall BitBtn5Click(TObject *Sender);
void __fastcall TabSheet3Exit(TObject *Sender);
void __fastcall BitBtn2Click(TObject *Sender);
void __fastcall BitBtn8Click(TObject *Sender);
void __fastcall BitBtn15Click(TObject *Sender);
void __fastcall BitBtn6Click(TObject *Sender);
void __fastcall BitBtn7Click(TObject *Sender);
void __fastcall TabSheet7Exit(TObject *Sender);
private: // User declarations
public: // User declarations
    __fastcall TForm2(TComponent* Owner);
};
//-----
extern PACKAGE TForm2 *Form2;
//-----
#endif

```

V. RESULTADOS

En el desarrollo del presente libro se ha venido exponiendo los resultados y los buenos procedimientos obtenidos en el diseño, pruebas e implementación de cada parte que conforma esta herramienta que es de gran utilidad en esbozo de pozos productores de petróleo y de pozos de inyección de agua.

En el apartado de los ANEXOS A, B son los resultados de los circuitos finales que se proyectaron y materializaron correspondientes a la herramienta de fondo y al sistema de adquisición de datos y el ANEXO C se muestra un registro tomado con la herramienta que aquí se diseñó.

Por último, se plasman imágenes del proceso, incluyendo el chasis de la herramienta de fondo, circuitería de la herramienta de fondo, circuitería del sistema de adquisición de datos, pruebas de laboratorio realizadas y un registro direccional tomado con la herramienta.

5.1 Imágenes del chasis y housing de la herramienta de fondo.

La parte “dura” de la herramienta de fondo o sarta como en algunas ocasiones se le ha llamado, se realizó con los servicios de torno que se ofrecen en la ciudad de Neiva.

Para el diseño del chasis y housing de la herramienta de fondo se tuvo en consideración el tamaño de la main board y la ubicación de los sensores de aceleración y gyro, recordemos que ellos se deben instalar formando un ángulo de 90° para tener la aceleración en los ejes x, y.



Figura 48: Chasis de la herramienta de fondo



Figura 49: Housing de la herramienta de fondo

Como la herramienta de fondo se ubicará en lo profundo del pozo, esta debe resistir alta presión y temperaturas de consideración (alrededor de 90°F), por ello se dotó de O-ring para garantizar que la presión y dicha temperatura no afectara el sistema.



Figura 50: Detalle de los canales para O-ring de presión

Además la herramienta de fondo debe estar provista de conector por el cual le llegará el voltaje de alimentación y es el mismo medio que utilizará para transmitir la información tomada por la sensorica, teniendo en cuenta que el voltaje de alimentación debe también llegar a otras herramientas, cuando estas se conecta en tándem, por lo tanto se implementó conector eléctrico macho y conector eléctrico hembra.



A.



B.

Figura 51: A. Detalle del conector eléctrico macho B. Detalle del conector eléctrico hembra



Figura 52: Acople del housing con el chasis de la herramienta de fondo

5.2 Imágenes de la instalación de los acelerómetros y main board de la herramienta de fondo

Para medir la aceleración en los ejes x, y se ubicaron los sensores de aceleración a 90° respecto a su propio eje. Se detalla el montaje que se realizó para este propósito en la figura 52.

En la figura 56 se muestra el ensamble de la electrónica de la herramienta de fondo, dentro del chasis, que posteriormente se cubre con el housing.

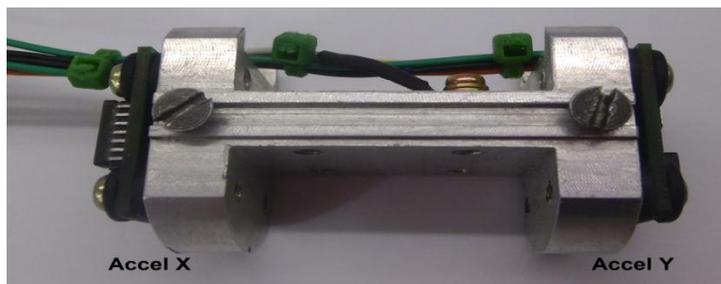


Figura 53: Ubicación de los Acelerómetros

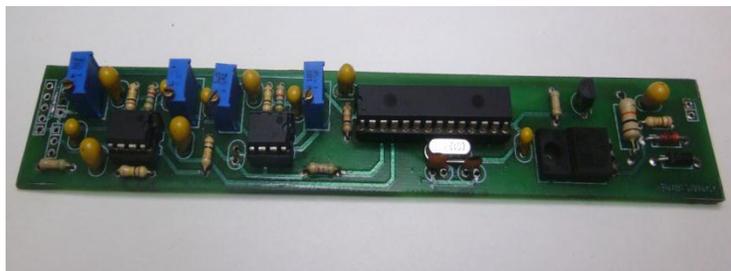


Figura 54: Main board de la herramienta de fondo

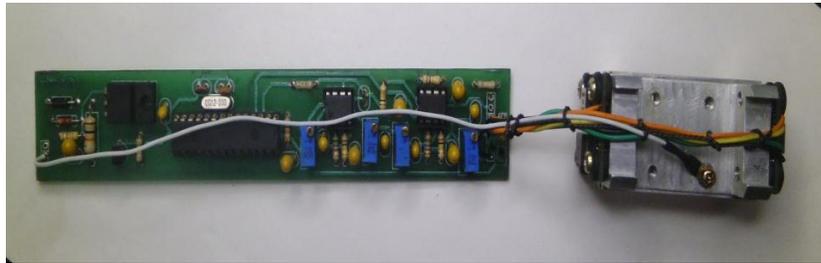


Figura 55: Conexión de la sensórica con la main board herramienta de fondo

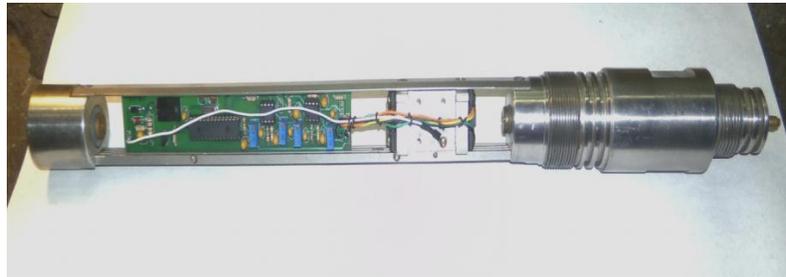


Figura 56: Ensamble de la electrónica y chasis de la herramienta de fondo

5.3 Imágenes de la interfaz de comunicación

La parte externa frontal de la interfaz de comunicación se pensó diseñarla muy similar al sistema de adquisición WARRIOR, para que de alguna forma se generara más aceptación y confianza por parte de los clientes, ya que los productos nacionales, a pesar de que son bien diseñados, de excelente calidad y tienen las mismas o quizás mejores prestaciones que los sistemas importados, no cuenta con adeptos en nuestro país.

Los mandos son sencillos y fácil de operar: Interruptor MAIN principal y su respectivo indicador de encendido, visualizador de voltaje y corriente que la interfaz entrega a la línea de salida, la perilla POWER ADJ con la cual se graduará el voltaje de salida desde 0 – 160 voltios DC, led indicador de SYNC que sirve para conocer el momento en que la herramienta se engancha con la interfaz de comunicación (el led debe centellar continuamente, cuando halla comunicación), perilla SIGNAL ADJ que da ajuste fino a la señal para conseguir enganche y por último el interruptor TOOL POWER que da paso de voltaje a la herramienta de fondo con su indicador.

Además se adjunta la figura 57 y 58 para realizar una comparación visual con el sistema de adquisición WARRIOR.



Figura 57: Parte frontal de la interfaz de adquisición



Figura 58: Parte frontal del sistema de adquisición WARRIOR

La interfaz de comunicación en la parte posterior cuenta con el conector destinado al encoder el cual tomará el dato equivalente a la profundidad medida (marcada ENCODER)), salida para la línea donde se conectará el cable eléctrico mono conductor (marcada como LINE), entrada de AC para los 120 Voltios (marcada como AC IN), sus respectivos fusibles, de 3 amperios para la entrada total del sistema y 1 amperio para el voltaje que sale por LINE y dos ventiladores que garantizará la evacuación del calor que se produzca en su interior.

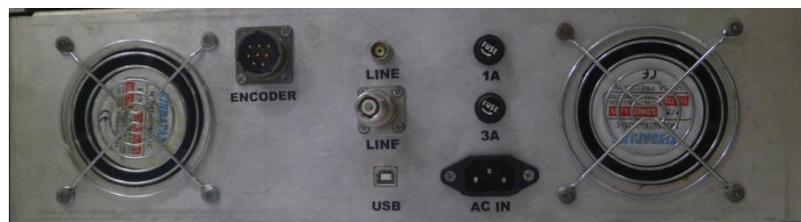


Figura 59: vista posterior de la interfaz de comunicación

En la parte interna se detalla la ubicación de las tarjetas que se diseñaron:

Lateral izquierda se observa el convertor de serial (RS232) a USB y las fuentes de baja que provee los 5 voltios al sistema, en el centro de la caja se ubican la tarjeta principal y el transformador de aislamiento, lateral derecha la fuente de alta que proporciona el voltaje de 0 – 160 voltios DC y en el fondo los ventiladores que mantiene la temperatura baja. Esto ello se observa en la figura 59.



Figura 60: Vista interna del sistema de la interfaz de comunicación

5.4 Imágenes del software instalado en el computador del usuario

La característica principal de todo el diseño de este trabajo de grado es el de producir una herramienta que nos indique el trazo de la trayectoria del pozo de fácil manejo y no es la excepción el software, ya que se debe prestar todas las comodidades al ingeniero de registro para no ser víctima de complicaciones en la toma del survey.

Este software se instalará sólo en el camión de registro de electric line, por conveniencia debido a la patente en proceso, exige que este se instale en un computador, mientras se licencia el programa. Además como propietario de esta herramienta es empresa APPLIED OIL TECH S.A.S así lo dispuso.

Presento los pantallazos que muestra el software al ingeniero de registro con sus respectivos comentarios explicativos para hacer más agradable el manejo íntegro de las prestaciones de esta herramienta.

El software debe ser previamente instalado en el computador del usuario, que generalmente está ubicado en la unidad de registro de electric line.

Al hacer doble click en icono del ejecutable Gyrotech se muestra la pestaña **Config** la cual nos indica la configuración preliminar del sistema. En la opción **Port** se escoge el puerto COM por el cual se conecta el puerto USB que va para la interfaz de comunicación. Además se elige el **Baud rate** que es en este caso 9600 baudios por segundo, el **Data bits** de 8, **Stop bits** que

es 1, la **Parity** y el **Flow control** se escoge la opción None. Note que se utiliza terminología en inglés, ya que es un idioma generalizado en implementaciones tecnológicas y se busca crear la sensación que estar frente a un sistema de fabricación norteamericana.

En **Encoder settings** se ajusta el valor de **Ft / rev** que es el equivalente de la cantidad de pies que varía en relación a una vuelta, en este caso se utilizó un encoder que por cada 2 pies (Ft) su eje gira 1 vuelta (rev). En **Pulse / rev** es la cantidad de pulsos (Pulse) que genera por cada vuelta (rev) este valor es de 200 pulsos por vuelta. En la caja de **1000 ft correct** es para ajustar la corrección por cada 1000 pies, esto ocurre cuando el encoder presenta una des calibración producida por el tiempo de uso.

En **New depth** se coloca la profundidad de donde se va a iniciar el registro direccional, que en ocasiones no es la profundidad total del pozo, esta longitud se escoge por decisión del cliente.

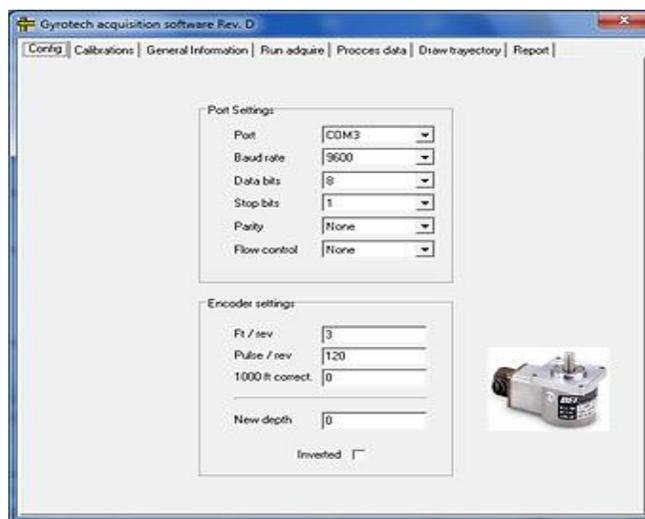


Figura 61: Pestaña de Config

En **Calibrations** se realiza la calibración de la herramienta (es de suponer que todo el sistema está debidamente conectado: Herramienta de fondo, Encoder a la Interfaz de Comunicación y esta al Computador del Usuario).

En la caja de dialogo de **Inclinometers** se chulea la **InclX** y **InclY** correspondiente a -90°, 0° y 90°, ya que el valor de la inclinación va desde -90° hasta 90°. En **Gyrometer** se setea 0° y 360° porque este ángulo varia des de 0° hasta 360° (Azimut).

Luego se da click en el boto **Start** para que se inicie la calibración, la herramienta de fondo debe estar en posición completamente vertical para garantizar que estos valores sean muy próximos a cero. Si se desea salvar esta calibración para ser usada en trabajos posteriores se da click en **Save** o si ya se encuentra gravada una calibración anterior se la click en **Load** para cargarla. Y por último en **Reset** se resetea los valores que se obtuvieron en ese proceso de calibración.

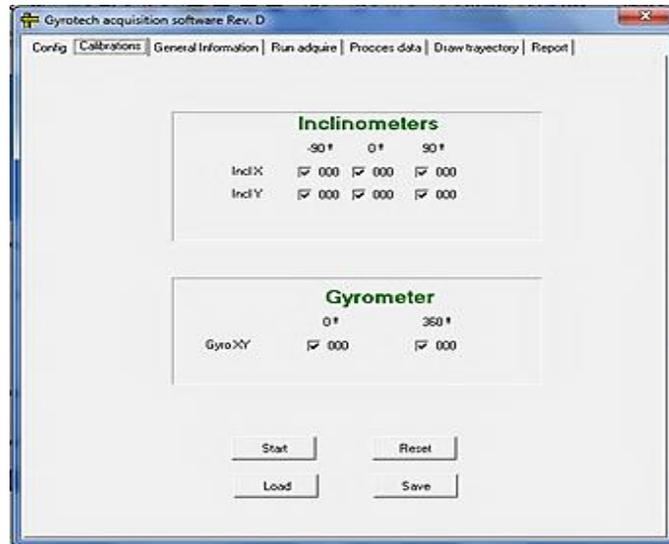


Figura 62: Pestaña de Calibrations

General Information se escribe la información general del trabajo, es decir: nombre del cliente (**Client**), campo (**Field**), pozo (**Well**), país (**Country**), estado (**State**), locación (**Location**), latitud survey (**Survey latitude**), longitud survey (**Survey longitude**), elevación de la mesa rotaria (**Rotary table elevation**).

Otros datos importantes que se tienen en cuenta: número del trabajo (**Job Number**), número del equipo (**Equipment number**), número de corrida (**Run Number**), fecha de survey (**Survey Date**), profundidad del survey (**Depth Logging**), intervalo inicial (**Top log interval**), intervalo final (**Bottom log interval**) y último nombre del Ingeniero de Registro (**Surveyor**).

En la esquina superior derecha está lo posibilidad de colocar una imagen del sitio donde se está corriendo el registro, solo con dar doble click y dando la ubicación del archivo y abrir, aparece dicha imagen.

También está la opción de abrir un survey anterior o crear uno nuevo.



Figura 63: Pestaña General Information

Run acquire, se inicia el registro o survey como tal, en **Open port** se abre el puerto de comunicación, **Capture** se adquiere el dato a la profundidad mostrada en **Measured Depth** y en **Reset** se resetean la adquisición. Además en **Line speed** se observa la velocidad con la que se mueve la herramienta de fondo dentro del pozo.

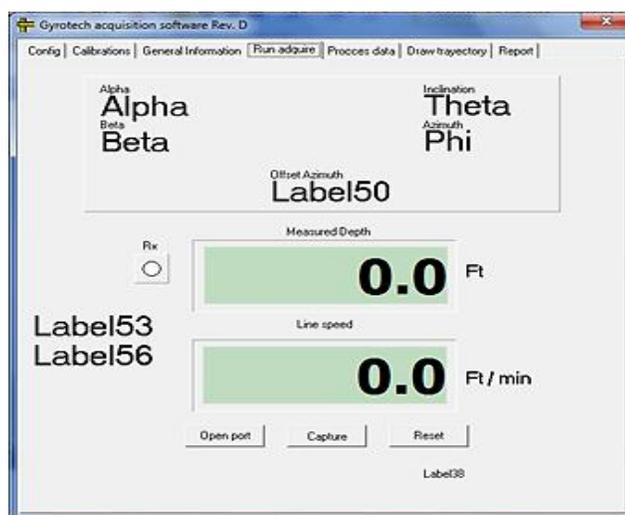


Figura 64: Pestaña Run acquire

En la pestaña **Process data** se escoge el método matemático dentro de las opciones están: Mínima curvatura, radio de curvatura, mercury, tangencial balanceado, promedio tangencia y tangencial. Se da click en el botón

Process para que el software procese los datos adquiridos, generándose una tabla con la data procesada.

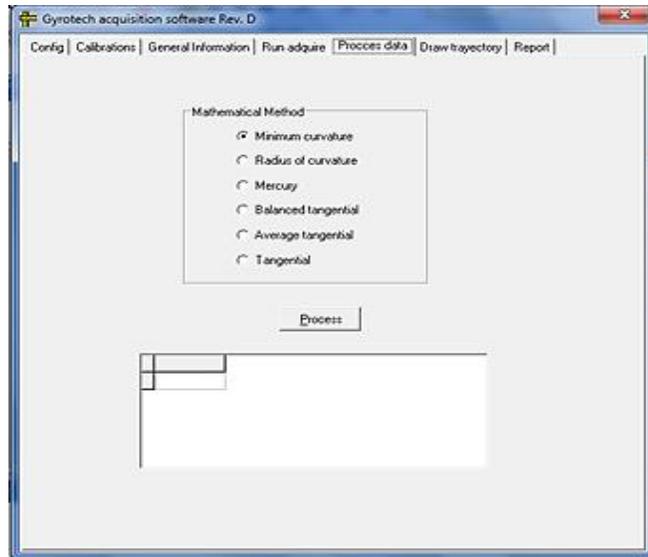


Figura 65: Pestaña Proces data

Draw trajectory muestra la trayectoria final del pozo, con el botón **Options** se edita la gráfica según el gusto del ingeniero de registro, para lograr facilidad de entendimiento.

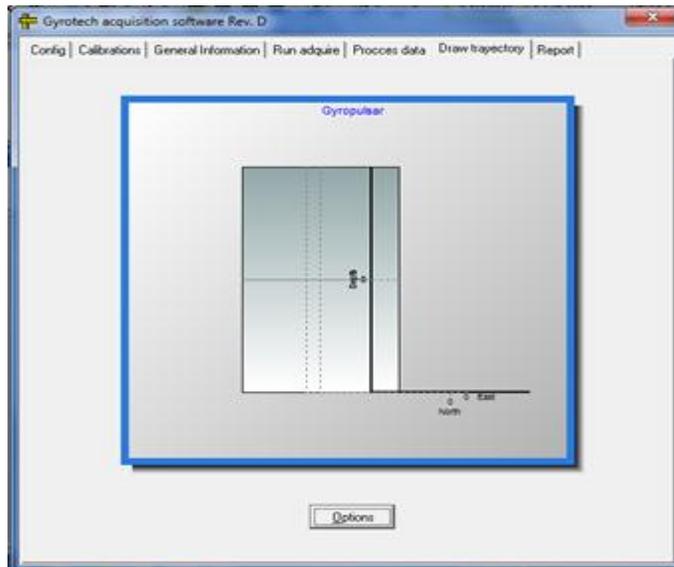


Figura 66: Pestaña de Draw trajectory

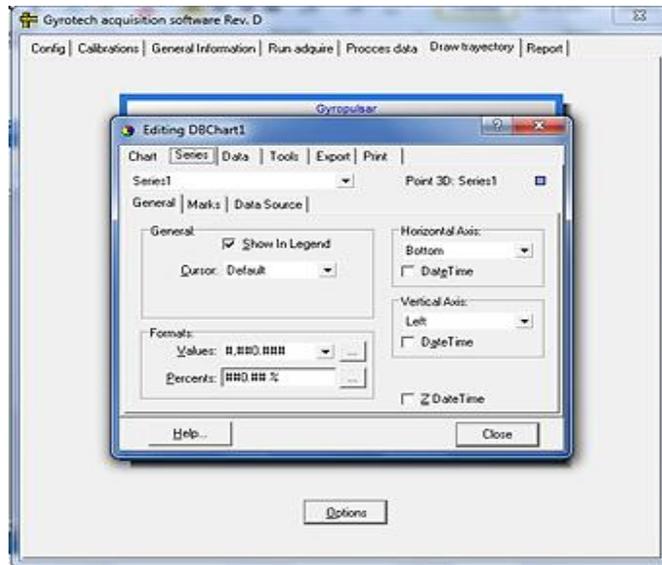


Figura 67: Pestaña Options

En la figura 68 se muestra el última pestaña **Report** del software del computador del usuario. Aquí se visualiza el reporte final del registro direccional, proporcionando la facilidad de búsqueda de palabras claves, búsqueda de página específica avance y retroceso de páginas, grabar archivo, imprimir y vista previa.

Hay que detallar que la información escrita en la pestaña **General Information** aparecerá en el reporte final.

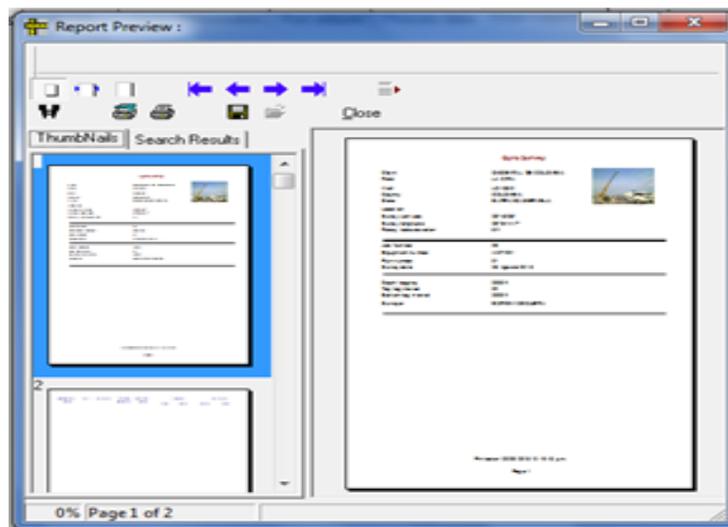


Figura 68: Pestaña Report

5.5 Imagen de pruebas de laboratorio

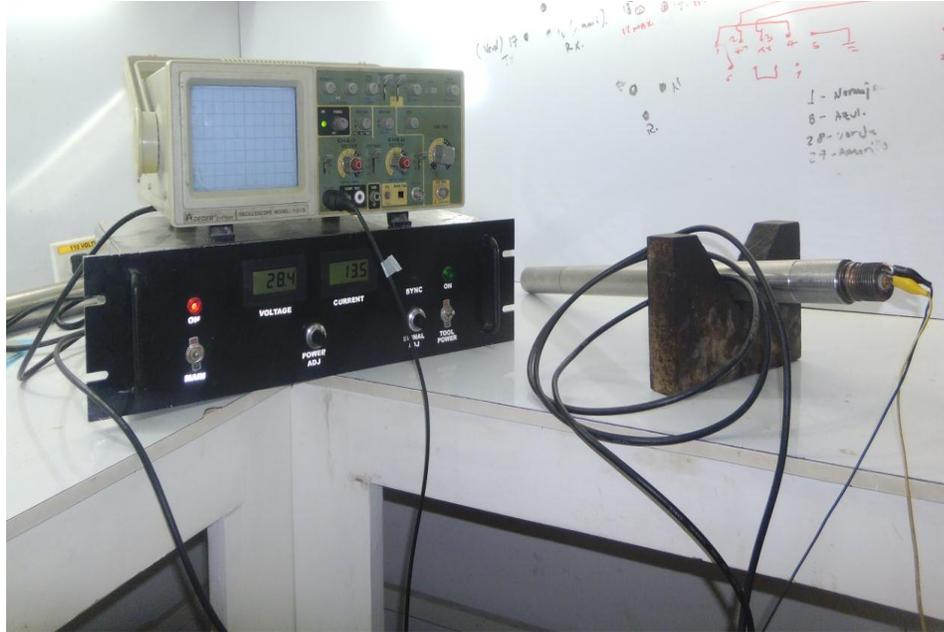


Figura 69: Prueba de la fuente de la interfaz de comunicación



Figura 70: Conexión total de herramienta de fondo, Interfaz de comunicación y computador del usuario



Figura 71: Oscilograma de la salida de la herramienta de fondo

En estas pruebas se verificó que la herramienta de fondo se comunicara con la interfaz, esto se visualizaba con el destello del led rojo indicando que encontraba en enganche.



Figura 72: Oscilograma de la señal de salida del microprocesador

En la figura 71 se muestra el oscilograma en tiempo real de la señal que entrega la herramienta de fondo, tomada del cable eléctrico mono conductor.

Tenemos en cuenta que la señal sufre gran deterioro debido a las pérdidas provocadas por la impedancia propia del cable. El sistema se diseñó para que funcione con una impedancia equivalente a desde 11.000 a 32.000 pies de cable y si esta impedancia es menor la herramienta de fondo no se engancha.

En la figura 72 se detalla el oscilograma de la señal que entrega el microprocesador. Esta señal esta ya tratada, se ve bien definida y lista para que la tome el conversor serial (RS232) a USB.

Esta información la recibe el computador del usuario ubicado en el camión de registro de electric line, el cual la procesa finalmente generando una tabla en formato texto (*.txt) para realizar las respectivas gráficas.

VI. CONCLUSIONES

- En el proceso de desarrollo de este trabajo de grado se hizo el estudio de la utilización de nuevos sensores como los acelerómetros MENS para determinar la inclinación de una superficie mediante la fuerza de gravedad la cual varía con relación al ángulo de interés.
- La utilización de giróscopos fue determinante para hallar el ángulo de azimut, ya que este entrega la tasa de cambio de la velocidad angular de la superficie donde se encuentre instalado, en función de la fuerza de Coriolis generada.
- La drástica atenuación de la señal que entrega la herramienta de fondo a la interfaz de comunicación es producida por la impedancia propia del cable eléctrico mono conductor que es de 4.4 Ohmios por cada 1000 pies, y ello hizo necesario la implementación de circuitos electrónicos para tratar y embellecer minimizando la pérdida de información.
- La calibración de la herramienta se hizo utilizando un sencillo sistema que garantizara la total verticalidad asegurando que los ángulos de inclinación y azimut fueran de cero.
- Conocer la inclinación y ángulo de azimut es de suma importancia para las operadoras de campos petroleros ya que con estos datos se toman decisiones cruciales en el momento de realizar nuevas perforaciones de cluster y así no afectar la producción de pozos ya perforados.
- El diseño e implementación sencilla y de fácil manejo de herramientas es extremadamente incidente en la minimización de errores humanos por parte de ingeniero de registros en el momento de utilizarlas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MANZANERES DEL MORAL ALBERTO. Estudio de Modelos Matemáticos de Acelerómetros Comerciales. España, (Tesis de Pregrado). Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla.
- [2] POZO ESPÍN DAVIC FERNANDO. (2010). Diseño y Construcción de una Plataforma Didáctica Para Medir Ángulos de Inclinación Usando Sensores Inerciales Como Acelerómetros y Giroscopios. Quito, (proyecto previo a la obtención del título de ingeniero en electrónica y control). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- [3] NATIONAL SANDIA LABORATORIES.(2005-2008). “Bugs on MEMS”, Disponible en <http://mems.sandia.gov/gallery/images_bugs_on_mems.html>
- [4] FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. (2007). Instrumentos Inerciales. Disponible en <<http://laboratorios.fi.uba.ar/lssc/espana/apuntes/CLASE0.pdf>>
- [5] QUERO REBOUL JOSÉ MANUEL. (2012). Evaluación de un Giroscopio MEMS en un Péndulo. España, (contenido curso 2011-2012). Microsistemas, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla.
- [6] ÁVILA DE LA TORRE MARCOS. (2005). Sensores de Velocidad.
- [7] CABRERA RICARDO.(noviembre, 2006). Cinemática escalar. Buenos Aires, Argentina. Disponible en <http://neuro.qi.fcen.uba.ar/ricuti/No_me_salén/CINEMATICA/AC_escalar.html> [Consulta 28 de febrero de 2013]
- [8] Ejemplo de Cálculo de Perforación Direccional. (enero 20, 2001). Disponible en < <http://achjij.blogspot.com/2011/01/ejemplo-de-calculo-de-perforacion.html>> [Consulta 1 de marzo, 2013]

[9] BELTRÁN AYALA JOAN MARCELO. (2005). Diseño y construcción de un Simulador de Sensores de un Pozo Direccional. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctricas, Electrónica y Telecomunicaciones. Bucaramanga.

[10] CALCULATE DOGLEG SEVERITY BETWEEN 2 SURVEY POINTS BASED ON RADIUS OF CURVATURE METHOD. Disponible en <www.drillingformulas.com/dogleg-severity-calculationbased-on-radius-of-curvature-method/>, [Consulta 2 de diciembre de 2012]

[11] TANGENCIAL METHOD. (En línea), disponible en <<http://www.drillingformulas.com/tangential-method-calculation/>> [consulta 2 de diciembre de 2012]

[12] BALANCED TANGENCAL METHOD. (En Línea), Disponible en <www.drillingformulas.com/balanced-tangencial-method-calculacion/>, [consulta 3 de diciembre de 2012]

[13] ANGLE-AVARAGING-METHOD. (En línea), disponible en <<http://www.drillingformulas.com/angle-averagingl-method-calculation/>> [consulta 3 diciembre 2012]

[14] MINIMUM CURVATURE METHOD. Disponible en <www.drillingformulas.com/minimun-curvature-method/>,[Consulta 3 de diciembre de 2012]

[15] PILLAJO OBANDO MARCELO FERNANDO, ROBAYO CAJAMARCA SIXTO BOLÍVAR. (2012). Desarrollo de un “Guante Electrónico de Datos” con Sensores Inerciales, Herramientas de Open Source y Comunicación Inalámbrica, que Interactúe con Imágenes del Cuerpo Humano en 3D para el Proyecto “Sistema de Entrenamiento Virtual para Medicina”. (Tesis previa a la obtención del título de ingeniero de sistemas). Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campo Sur.

[16] GARCÍA JOSÉ MÍLERES JR Dr., AMBROSIO LÁZARO ROBERTO CARLOS Dr., GARCÍA ANDRADE MIGUEL ÁNGEL Dr., RINCO JARA RODOLFO IVÁN. (2009). Desarrollo de Electrónica y Acondicionamiento de Señales de Acelerómetros de MENS. (Tesis previa a la obtención del título maestría).

[17] PARALLAX INC. Sensores Inteligentes y sus Aplicaciones, Guía del Estudiante, Versión 1.0 (versión en español)

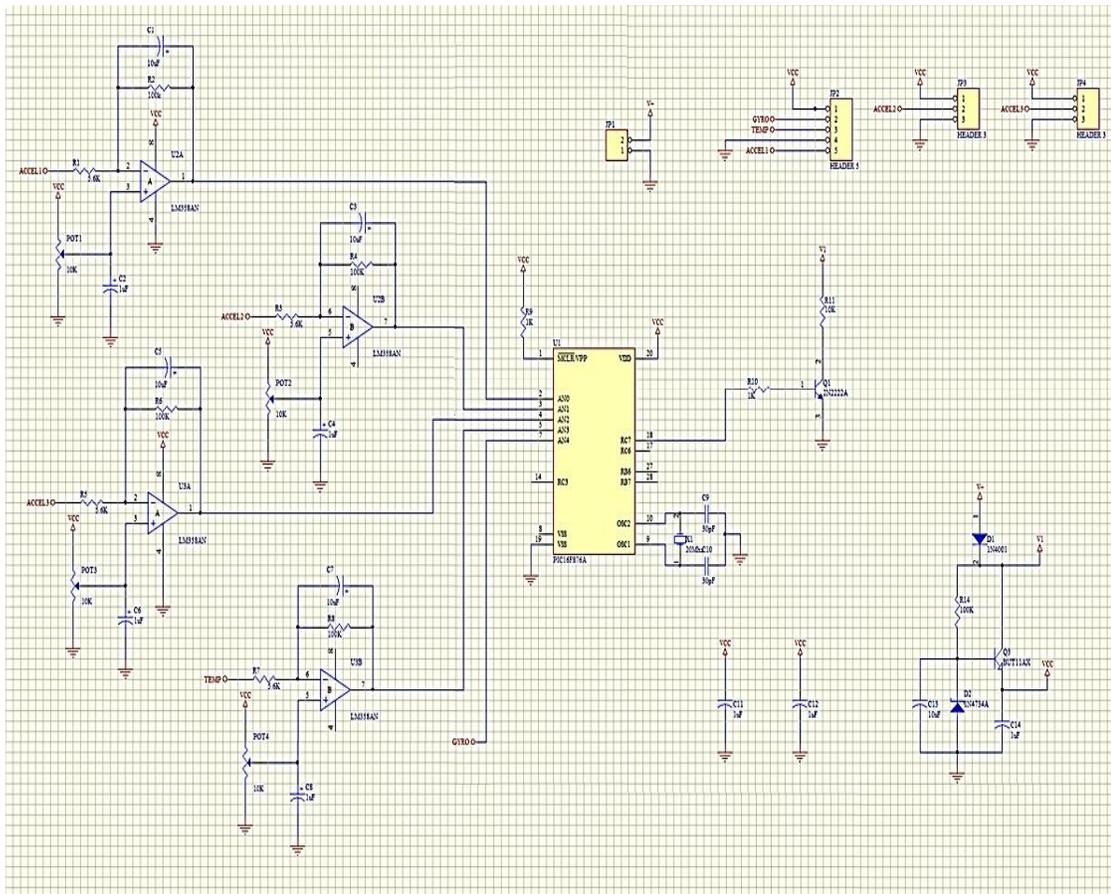
[18] WEST INSTRUMENTS DE MEXICO, S.A., Manual de Aplicación de Encoders. Una Guía de Referencia y Tutoría Sobre Encoders Para el Control de Movimiento: Tipos, Tecnologías, Aplicaciones e Instalaciones

[19] BUSCHIAZZO ANDRES. (2011). Mantenimiento Instrumental I, Unidad Complementaria 5 “Encoders”. Facultad Regional de Córdoba.

ANEXOS

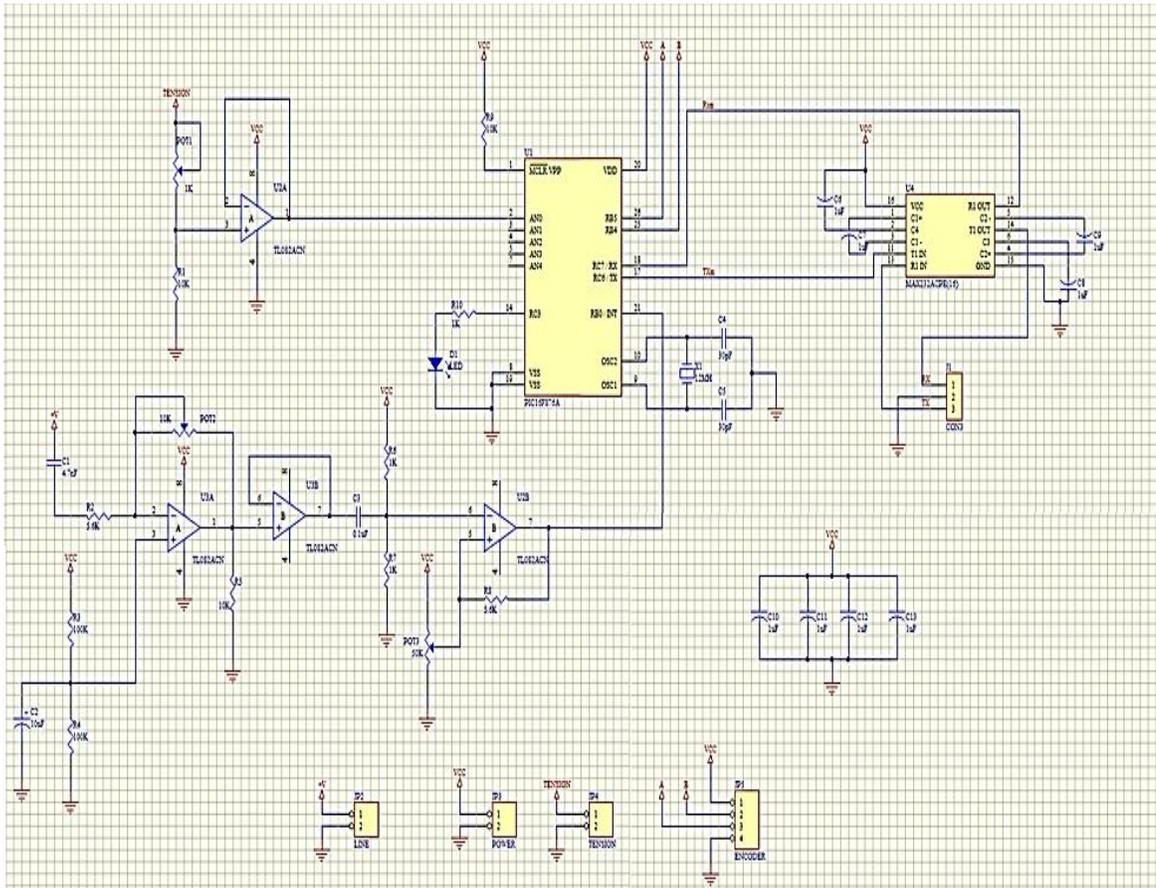
ANEXO A. DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE LA HERRAMIENTA DE FONDO

Después de haber diseñado y simulado con Proteus todos y cada uno de los bloques funcionales de la herramienta de fondo, se procede a alambrosarlos y simularlo en conjunto y comprobar su funcionamiento simulado, para proceder a materializar y realizar pruebas de campo reales de la herramienta de fondo.



ANEXO B. DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE LA INTERFAZ DE COMUNICACIÓN

Después de haber diseñado y simulado con Proteus todos y cada uno de los bloques funcionales de la Interfaz de Comunicación, se procede a alambrearlos y simularlo en conjunto y comprobar su funcionamiento simulado, para proceder a materializar y realizar pruebas de campo reales de la Interfaz de Comunicación.



**ANEXO C: REGISTRO DIRECCIONAL TOMADO CON LA HERRAMIENTA
DISEÑADA**

Registro Direccional Gyro

XXX XXX

| | |
|--------------------------|-------------------------------|
| Operadora | : XXXXX |
| Campo / Pozo | : XXXXX |
| País | : Colombia |
| Fecha | : Agosto 08 / 2013 |
| Ingenieros | : B. Mosquera |
| Código de Reporte | : Gyro-XXX-XXX-XXX-2013-08-08 |

| | | |
|--|----------------------------------|--|
| | Registro Direccional Gyro | |
|--|----------------------------------|--|

| |
|---------------|
| ÍNDICE |
|---------------|

1. Secuencia de Eventos
2. Datos Operacionales y del Pozo
3. Diagrama de la Sarta
4. Survey
5. Control de Calidad
6. Vista Vertical Oeste-Este
7. Vista Vertical Norte-Sur
8. Vista de planta

Registro Direccional Gyro

SECUENCIA DE EVENTOS

Operadora : XXXXX
 Campo/Pozo : XXXXX

Prueba : Registro Direccional Gyro
 Ingenieros : B. Mosquera

DESDE HASTA DELTA T

A C T I V I D A D

| Agosto 08 / 2013 | | |
|------------------|----------|---------|
| 14:15:10 | 14:30:05 | 0:14:55 |
| | | |
| 14:30:05 | 14:45:15 | 0:15:10 |
| 14:45:15 | 15:00:25 | 0:15:10 |
| | | |
| 15:00:25 | 15:40:10 | 0:39:45 |
| | 16:28:15 | |
| | 16:51:25 | |
| | 17:05:20 | |
| 17:05:20 | 17:20:25 | 0:15:05 |
| 17:20:25 | 17:30:15 | 0:09:50 |
| | | |
| | | |
| 17:30:15 | 18:25:00 | 0:54:45 |
| 18:25:00 | 18:43:00 | 0:18:00 |
| 18:43:00 | 19:00:35 | 0:17:35 |
| 19:00:35 | 19:30:30 | 0:29:55 |
| 19:30:30 | 20:13:15 | 0:42:45 |
| | | |
| | | |
| | 20:13:15 | |
| | 20:15:10 | |
| | 20:16:45 | |
| | 20:20:35 | |
| | 20:25:30 | |
| | 20:27:05 | |
| | 20:28:35 | |
| | 20:30:10 | |
| | 20:33:45 | |
| | 20:39:05 | |
| | 20:40:45 | |

| Agosto 08 / 2013 |
|--|
| Llegada a locacion pozo XXX- XXX. Se toman coordenadas geograficas del pozo. |
| Se realiza permiso de trabajo, ATS y charla preoperativa y seguridad. |
| Rig Up de la unidad de wire line de Setip Ingenieria. |
| RIH de sarta de Dummy Run: Cabeza electrica (1.5" x 0.83') + Barra de peso (1.75" x 7') electrica + X-Over (1,75" x 0,3') + Barra de peso de slickline (1.75" x 3') + X-Over (1,5" x 0,3') + Cortador de parafina 1.87" O.D. |
| Sarta perdió peso a 2197' se decide sacar. El cortador de parafina sale con tapon de parafina muy densa. Se limpia el cortador y se baja de nuevo. |
| Pasa por la obstrucción de 2197', pero se atasca de nuevo en 2290ft. Se realizan varios intentos para pasar sin éxito. |
| Se saca la sarta para ver si el cortador esta lleno de parafina. Se limpia y se baja de nuevo. |
| No pasa la sarta a 2295'. |
| Sarta en superficie. Se cambia sarta para Dummy con centralizadores . |
| RIH de sarta de Dummy Run: Cabeza electrica(1.5" x 0.83') + Barra de peso (1.75" x 7') electrica + X-Over (1,75" x 0,3') + swivel joint (1.75" x 1.86') + X-Over (1,5" x 0,3') + 3 swivel joint '(1.75" x 1.86') + Centralizador de ruedas + housing Gyro +Centralizador de ruedas + X-Over (1.75" x 0.42') + Shock absorber(1.5" x 1.38') + nariz. (1,5" x 0,16'). |
| Se realiza dummy run @ 2297'. Wire line. POOH. |
| Sarta en superficie. Se cambia sarta para registro. |
| Se programa sonda gyro de Applied Oil Tech. |
| Seteando cara de la herramienta. |
| RIH de sarta de registro: Cabeza electrica(1.5" x 0.83') + Barra de peso (1.75" x 7') electrica + X-Over (1,75" x 0,3') + swivel joint (1.75" x 1.86') + X-Over (1,5" x 0,3') + 3 swivel joint '(1.75" x 1.86') + Centralizador de flejes + Sonda Gyro + Centralizador de flejes + X-Over (1.75" x 0.42') + Shock absorber(1.5" x 1.38') + nariz. (1,5" x 0,16'). @ 2297' RTE. |
| POOH de sarta de registro desde 2297' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 2200' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 2100' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 2000' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1900' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1800' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1700' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1600' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1500' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1400' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1300' RTE. |

Registro Direccional Gyro

DATOS OPERACIONALES Y DEL POZO

Cliente : XXXXX

Prueba : Registro Direccional Gyro

Fecha : Agosto 08 / 2013

Pozo : xxx xxx

Latitud : 6° 51' 45" N

Longitud : 73° 45' 54" W +/- 2m

Altitud (ft) : 423,23

RIG : Unidad Wire Line, Setip Ingenieria.

Mesa Rotaria (ft) : 6'

Casing : 2 Jts Casing Joint 16.000", J-55, 71 Lb/ft, 6' a 69' ID:15.642"
1 Jts Float Shoe 16.000", 69' a 70'. ID:15.642"
121 Jts Casing Joint 10.750", J-55, 54Lb/ft, 6' a 2598', ID:10.000
1 Jts Guide Shoe 10.750", 2598' a 2599' ID:10.000".
1Jts Liner Hanger 11.000", 2569' a 2571', ID:8.500"
1 Jts Casing Joint 8.500", 2571' a 2591', ID:8.000"
34 Jts Slotted Casing 8.500", 2591' a 3300', ID:8.000"

Tubing : 82 Jts Tubing joint 2.375", 6' a 2505.3', ID. 2.175"
1 Jts Seal Nipple 2.315" 2505.3' a 2506.0', ID:2.175'
1 Jts Tubin Joint 2.375" 2506' a 2507' ID:2.175'

Profundidad de Registro (ft) : 2297' BMR

Intervalos de Registro : 2297' - 0'

Tiempo Registro fondo (Hr) : 0:55 h

Metodo de cálculo : Minima Curvatura

Ingeniero : B. Mosquera

Registro Direccional Gyro

SURVEY

Operadora : XXXXX
 Campo/Pozo: XXXXX

Prueba : Registro Direccional Gyro
 Ingeniero : B. Mosquera

| Depth | | Orientacion | | Horizontal Coordinates | | Closure | | Doglet Severity |
|-------|---------|-------------|--------|------------------------|--------|----------|---------|-----------------|
| MD | TVD | INC | AZ | N | E | Distance | Azimuth | %/100ft |
| 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 99.98 | 0.20 | 241.90 | -1.61 | -0.07 | 1.61 | 182.49 | 0.20 |
| 200 | 199.98 | 0.24 | 73.11 | -1.63 | -0.02 | 1.63 | 180.70 | 0.44 |
| 300 | 299.96 | 1.98 | 57.83 | -0.66 | 1.63 | 1.76 | 112.04 | 1.75 |
| 400 | 399.87 | 2.86 | 79.73 | 0.70 | 5.53 | 5.57 | 82.79 | 1.26 |
| 500 | 499.71 | 3.60 | 84.49 | 1.44 | 11.10 | 11.19 | 82.61 | 0.79 |
| 600 | 599.51 | 3.79 | 86.24 | 1.96 | 17.51 | 17.62 | 83.61 | 0.22 |
| 700 | 699.28 | 3.95 | 86.43 | 2.39 | 24.24 | 24.36 | 84.37 | 0.16 |
| 800 | 798.94 | 5.45 | 96.89 | 2.03 | 32.40 | 32.46 | 86.41 | 1.72 |
| 900 | 898.38 | 6.70 | 100.11 | 0.43 | 42.88 | 42.88 | 89.43 | 1.30 |
| 1000 | 997.61 | 7.49 | 100.14 | -1.74 | 55.07 | 55.10 | 91.81 | 0.79 |
| 1100 | 1096.62 | 8.53 | 98.15 | -3.95 | 68.86 | 68.97 | 93.28 | 1.08 |
| 1200 | 1195.46 | 8.95 | 104.46 | -6.95 | 83.76 | 84.05 | 94.74 | 1.05 |
| 1300 | 1294.06 | 10.19 | 103.98 | -11.03 | 99.91 | 100.52 | 96.30 | 1.24 |
| 1400 | 1392.15 | 12.18 | 101.87 | -15.35 | 118.86 | 119.85 | 97.36 | 2.03 |
| 1500 | 1489.76 | 12.90 | 103.83 | -20.20 | 140.06 | 141.51 | 98.21 | 0.84 |
| 1600 | 1586.83 | 14.86 | 104.49 | -26.19 | 163.31 | 165.40 | 99.11 | 1.97 |
| 1700 | 1683.19 | 16.11 | 104.36 | -32.84 | 189.19 | 192.02 | 99.85 | 1.25 |
| 1800 | 1778.88 | 17.58 | 103.52 | -39.82 | 217.35 | 220.97 | 100.38 | 1.49 |
| 1900 | 1873.77 | 19.19 | 105.53 | -47.76 | 247.90 | 252.46 | 100.90 | 1.73 |
| 2000 | 1967.71 | 20.85 | 106.16 | -57.19 | 280.84 | 286.60 | 101.51 | 1.67 |
| 2100 | 2060.24 | 23.68 | 104.40 | -67.00 | 317.43 | 324.42 | 101.92 | 2.91 |
| 2200 | 2151.18 | 25.52 | 98.92 | -75.33 | 358.17 | 366.01 | 101.88 | 2.93 |
| 2297 | 2238.00 | 27.44 | 95.49 | -80.71 | 401.07 | 409.11 | 101.38 | 2.45 |

Profundidades referidas a la RTE (6 ft) del taladro
 Azimuth referidos al norte verdadero
 Closure Calculated from Well Head Location
 Horizontal Coordinates Calculated from Well Head Location
 Calculation Method: MINIMUM CURVATURE

Registro Direccional Gyro

CONTROL DE CALIDAD

Serial Gyro : GT1-3258

Maxima temperatura del gyro (°F) : 96.2°

Declinación Magnética : -7.19848

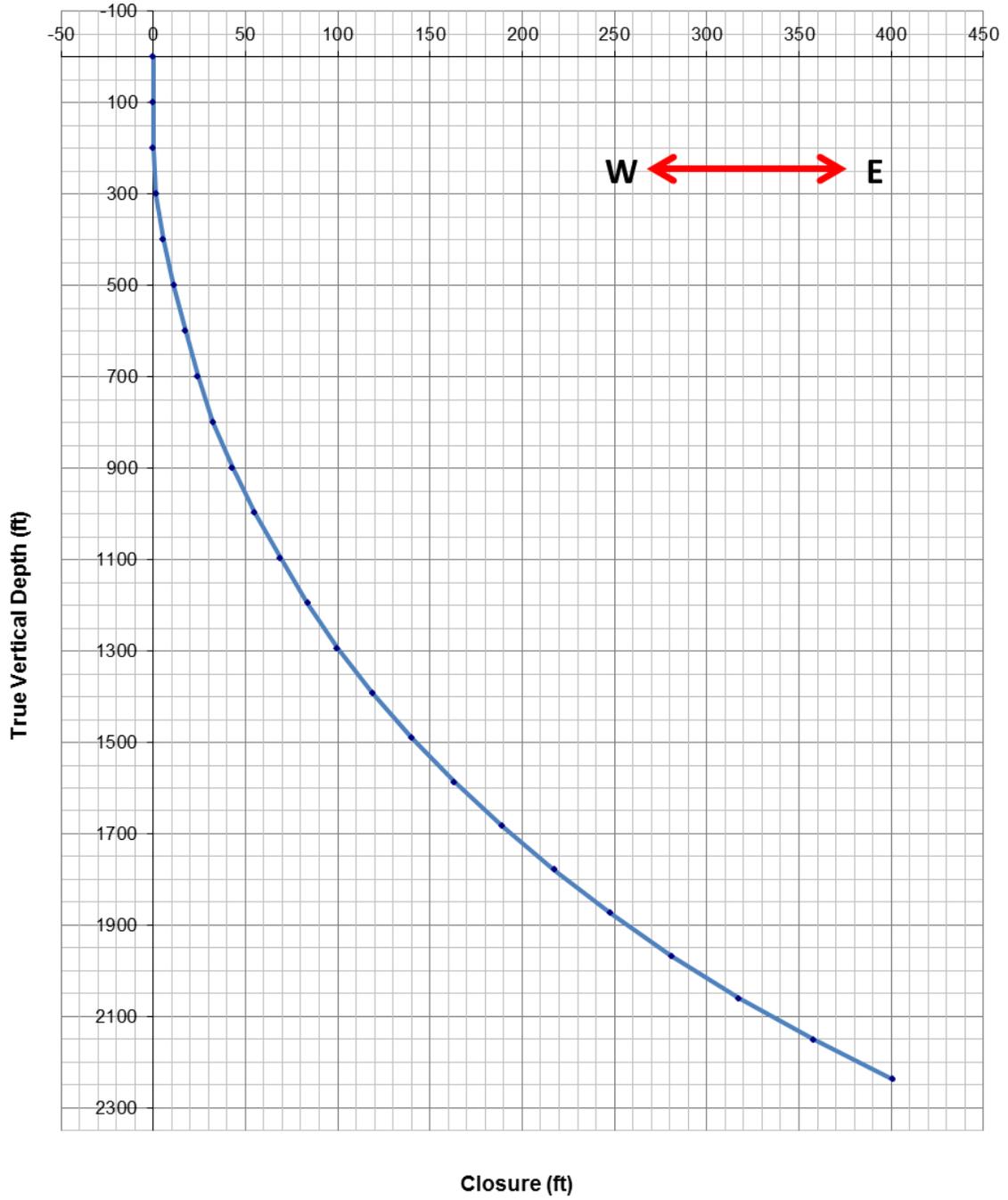
Se toman 5 lecturas de la herramienta a dos profundidades diferentes para verificar repetibilidad en inclinación y azimuth

| INCLINACION | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1500 | 12.90 | 12.91 | 12.90 | 12.90 | 12.90 |
| 2000 | 20.86 | 20.85 | 20.85 | 20.86 | 20.85 |

| AZIMUTH | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1500 | 103.83 | 103.83 | 103.85 | 103.91 | 103.38 |
| 2000 | 106.38 | 106.16 | 106.15 | 106.16 | 106.16 |

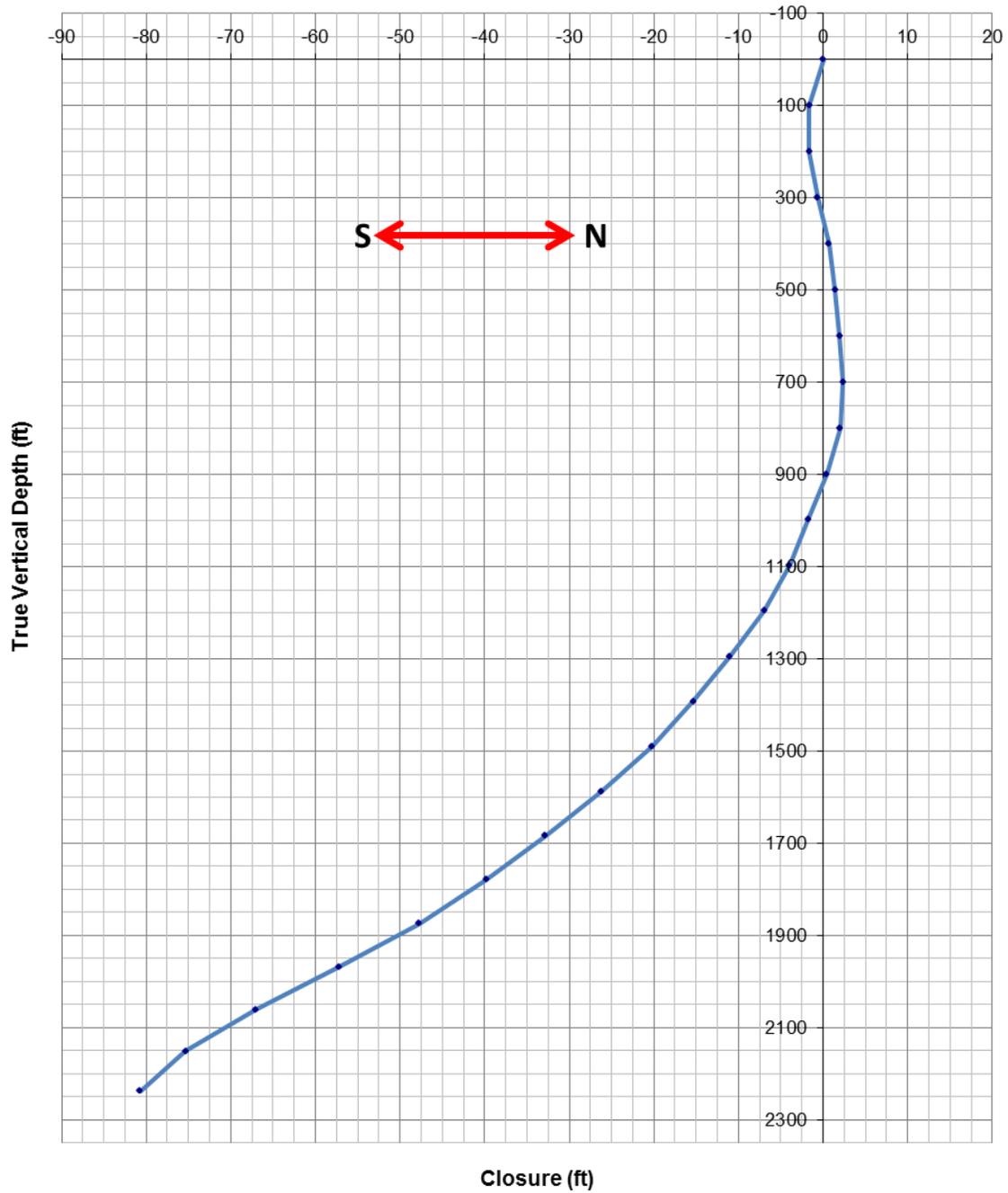
PERFIL DE VISTA OESTE-ESTE

Operadora : XXXXX
Pozo : XXXXX



PERFIL DE VISTA NORTE-SUR

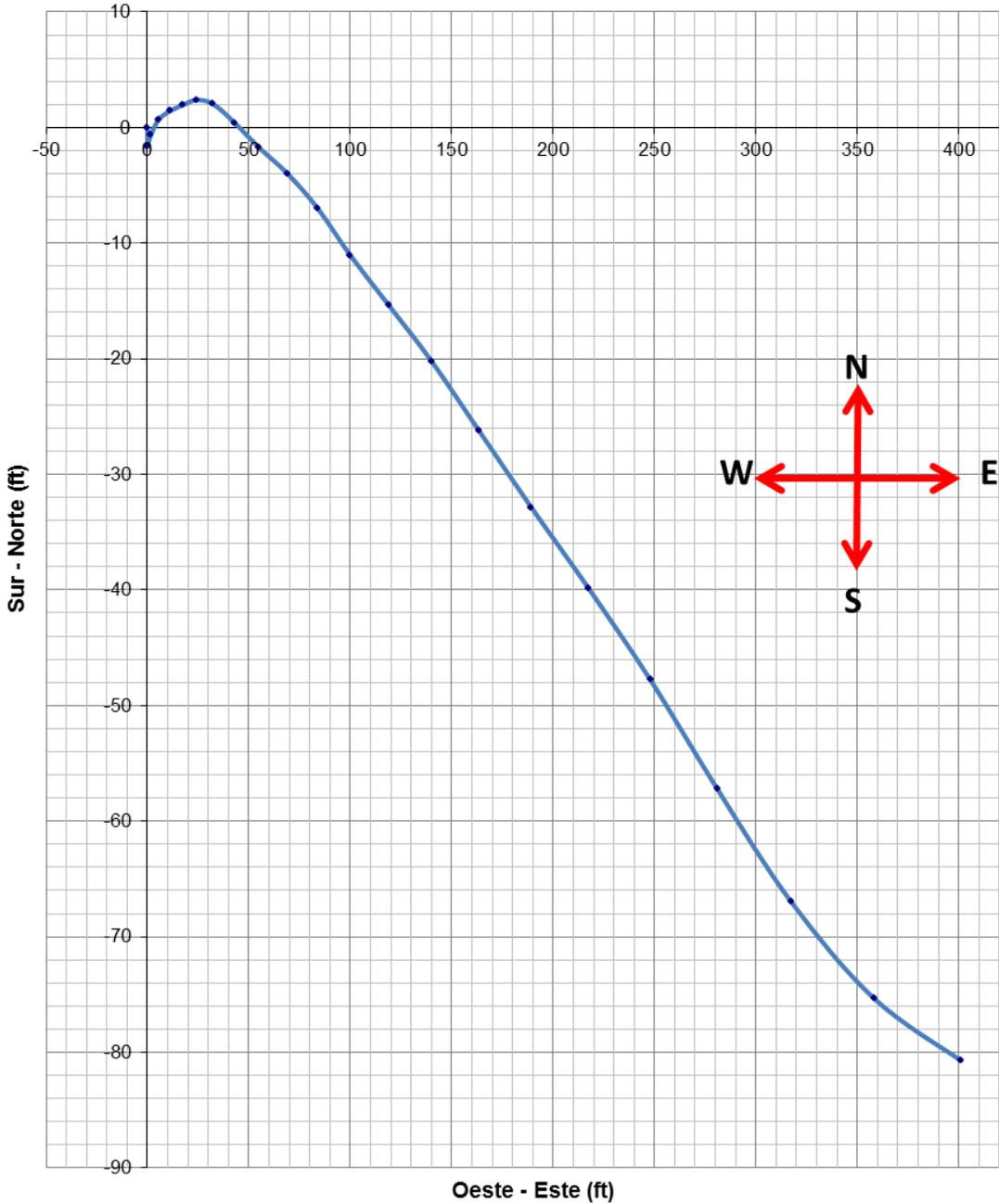
Operadora : XXXXX
Pozo : XXXXX



VISTA DE PLANTA

Operadora : XXXXXX

Pozo : XXXXX



**ANEXO C: REGISTRO DIRECCIONAL TOMADO CON LA HERRAMIENTA
DISEÑADA**

Registro Direccional Gyro

XXX XXX

| | |
|--------------------------|-------------------------------|
| Operadora | : XXXXX |
| Campo / Pozo | : XXXXX |
| País | : Colombia |
| Fecha | : Agosto 08 / 2013 |
| Ingenieros | : B. Mosquera |
| Código de Reporte | : Gyro-XXX-XXX-XXX-2013-08-08 |

| | | |
|--|----------------------------------|--|
| | Registro Direccional Gyro | |
|--|----------------------------------|--|

| |
|---------------|
| ÍNDICE |
|---------------|

1. Secuencia de Eventos
2. Datos Operacionales y del Pozo
3. Diagrama de la Sarta
4. Survey
5. Control de Calidad
6. Vista Vertical Oeste-Este
7. Vista Vertical Norte-Sur
8. Vista de planta

Registro Direccional Gyro

SECUENCIA DE EVENTOS

Operadora : XXXXX
 Campo/Pozo : XXXXX

Prueba : Registro Direccional Gyro
 Ingenieros : B. Mosquera

DESDE HASTA DELTA T

ACTIVIDAD

| Agosto 08 / 2013 | | |
|------------------|----------|---------|
| 14:15:10 | 14:30:05 | 0:14:55 |
| | | |
| 14:30:05 | 14:45:15 | 0:15:10 |
| 14:45:15 | 15:00:25 | 0:15:10 |
| | | |
| 15:00:25 | 15:40:10 | 0:39:45 |
| | | |
| | 16:28:15 | |
| | | |
| | 16:51:25 | |
| | | |
| | 17:05:20 | |
| 17:05:20 | 17:20:25 | 0:15:05 |
| 17:20:25 | 17:30:15 | 0:09:50 |
| | | |
| | | |
| | | |
| 17:30:15 | 18:25:00 | 0:54:45 |
| 18:25:00 | 18:43:00 | 0:18:00 |
| 18:43:00 | 19:00:35 | 0:17:35 |
| 19:00:35 | 19:30:30 | 0:29:55 |
| 19:30:30 | 20:13:15 | 0:42:45 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | 20:13:15 | |
| | 20:15:10 | |
| | 20:16:45 | |
| | 20:20:35 | |
| | 20:25:30 | |
| | 20:27:05 | |
| | 20:28:35 | |
| | 20:30:10 | |
| | 20:33:45 | |
| | 20:39:05 | |
| | 20:40:45 | |

| Agosto 08 / 2013 |
|--|
| Llegada a locacion pozo XXX- XXX. Se toman coordenadas geograficas del pozo. |
| Se realiza permiso de trabajo, ATS y charla preoperativa y seguridad. |
| Rig Up de la unidad de wire line de Setip Ingenieria. |
| RIH de sarta de Dummy Run: Cabeza electrica (1.5" x 0.83') + Barra de peso (1.75" x 7') electrica + X-Over (1,75" x 0,3') + Barra de peso de slickline (1.75" x 3') + X-Over (1,5" x 0,3') + Cortador de parafina 1.87" O.D. |
| Sarta perdió peso a 2197' se decide sacar. El cortador de parafina sale con tapon de parafina muy densa. Se limpia el cortador y se baja de nuevo. |
| Pasa por la obstrucción de 2197', pero se atasca de nuevo en 2290ft. Se realizan varios intentos para pasar sin éxito. |
| Se saca la sarta para ver si el cortador esta lleno de parafina. Se limpia y se baja de nuevo. |
| No pasa la sarta a 2295'. |
| Sarta en superficie. Se cambia sarta para Dummy con centralizadores . |
| RIH de sarta de Dummy Run: Cabeza electrica(1.5" x 0.83') + Barra de peso (1.75" x 7') electrica + X-Over (1,75" x 0,3') + swivel joint (1.75" x 1.86') + X-Over (1,5" x 0,3') + 3 swivel joint '(1.75" x 1.86') + Centralizador de ruedas + housing Gyro +Centralizador de ruedas + X-Over (1.75" x 0.42') + Shock absorber(1.5" x 1.38') + nariz. (1,5" x 0,16'). |
| Se realiza dummy run @ 2297'. Wire line. POOH. |
| Sarta en superficie. Se cambia sarta para registro. |
| Se programa sonda gyro de Applied Oil Tech. |
| Seteando cara de la herramienta. |
| RIH de sarta de registro: Cabeza electrica(1.5" x 0.83') + Barra de peso (1.75" x 7') electrica + X-Over (1,75" x 0,3') + swivel joint (1.75" x 1.86') + X-Over (1,5" x 0,3') + 3 swivel joint '(1.75" x 1.86') + Centralizador de flejes + Sonda Gyro + Centralizador de flejes + X-Over (1.75" x 0.42') + Shock absorber(1.5" x 1.38') + nariz. (1,5" x 0,16'). @ 2297' RTE. |
| POOH de sarta de registro desde 2297' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 2200' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 2100' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 2000' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1900' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1800' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1700' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1600' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1500' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1400' RTE. |
| Gyro s/n GT1-3258 @ 1300' RTE. |

Registro Direccional Gyro

DATOS OPERACIONALES Y DEL POZO

Cliente : XXXXX

Prueba : Registro Direccional Gyro

Fecha : Agosto 08 / 2013

Pozo : xxx xxx

Latitud : 6° 51' 45" N

Longitud : 73° 45' 54" W +/- 2m

Altitud (ft) : 423,23

RIG : Unidad Wire Line, Setip Ingenieria.

Mesa Rotaria (ft) : 6'

Casing : 2 Jts Casing Joint 16.000", J-55, 71 Lb/ft, 6' a 69' ID:15.642"
1 Jts Float Shoe 16.000", 69' a 70'. ID:15.642"
121 Jts Casing Joint 10.750", J-55, 54Lb/ft, 6' a 2598', ID:10.000
1 Jts Guide Shoe 10.750", 2598' a 2599' ID:10.000".
1Jts Liner Hanger 11.000", 2569' a 2571', ID:8.500"
1 Jts Casing Joint 8.500", 2571' a 2591', ID:8.000"
34 Jts Slotted Casing 8.500", 2591' a 3300', ID:8.000"

Tubing : 82 Jts Tubing joint 2.375", 6' a 2505.3', ID. 2.175"
1 Jts Seal Nipple 2.315" 2505.3' a 2506.0', ID:2.175'
1 Jts Tubin Joint 2.375" 2506' a 2507' ID:2.175'

Profundidad de Registro (ft) : 2297' BMR

Intervalos de Registro : 2297' - 0'

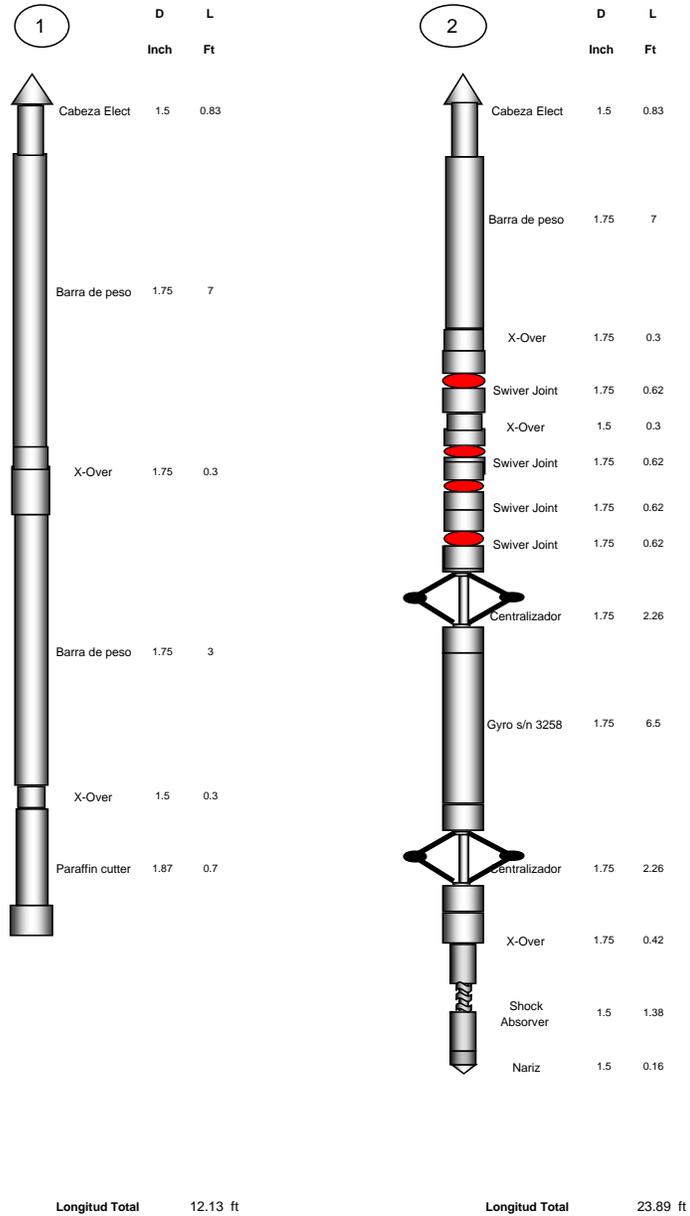
Tiempo Registro fondo (Hr) : 0:55 h

Metodo de cálculo : Minima Curvatura

Ingeniero : B. Mosquera

Registro Direccional Gyro

DIAGRAMA DE LAS SARTA



Registro Direccional Gyro

SURVEY

Operadora : XXXXX

Prueba : Registro Direccional Gyro

Campo/Pozo: XXXXX

Ingeniero : B. Mosquera

| Depth | | Orientacion | | Horizontal Coordinates | | Closure | | Doglet Severity |
|-------|---------|-------------|--------|------------------------|--------|----------|---------|-----------------|
| MD | TVD | INC | AZ | N | E | Distance | Azimuth | %100ft |
| 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 99.98 | 0.20 | 241.90 | -1.61 | -0.07 | 1.61 | 182.49 | 0.20 |
| 200 | 199.98 | 0.24 | 73.11 | -1.63 | -0.02 | 1.63 | 180.70 | 0.44 |
| 300 | 299.96 | 1.98 | 57.83 | -0.66 | 1.63 | 1.76 | 112.04 | 1.75 |
| 400 | 399.87 | 2.86 | 79.73 | 0.70 | 5.53 | 5.57 | 82.79 | 1.26 |
| 500 | 499.71 | 3.60 | 84.49 | 1.44 | 11.10 | 11.19 | 82.61 | 0.79 |
| 600 | 599.51 | 3.79 | 86.24 | 1.96 | 17.51 | 17.62 | 83.61 | 0.22 |
| 700 | 699.28 | 3.95 | 86.43 | 2.39 | 24.24 | 24.36 | 84.37 | 0.16 |
| 800 | 798.94 | 5.45 | 96.89 | 2.03 | 32.40 | 32.46 | 86.41 | 1.72 |
| 900 | 898.38 | 6.70 | 100.11 | 0.43 | 42.88 | 42.88 | 89.43 | 1.30 |
| 1000 | 997.61 | 7.49 | 100.14 | -1.74 | 55.07 | 55.10 | 91.81 | 0.79 |
| 1100 | 1096.62 | 8.53 | 98.15 | -3.95 | 68.86 | 68.97 | 93.28 | 1.08 |
| 1200 | 1195.46 | 8.95 | 104.46 | -6.95 | 83.76 | 84.05 | 94.74 | 1.05 |
| 1300 | 1294.06 | 10.19 | 103.98 | -11.03 | 99.91 | 100.52 | 96.30 | 1.24 |
| 1400 | 1392.15 | 12.18 | 101.87 | -15.35 | 118.86 | 119.85 | 97.36 | 2.03 |
| 1500 | 1489.76 | 12.90 | 103.83 | -20.20 | 140.06 | 141.51 | 98.21 | 0.84 |
| 1600 | 1586.83 | 14.86 | 104.49 | -26.19 | 163.31 | 165.40 | 99.11 | 1.97 |
| 1700 | 1683.19 | 16.11 | 104.36 | -32.84 | 189.19 | 192.02 | 99.85 | 1.25 |
| 1800 | 1778.88 | 17.58 | 103.52 | -39.82 | 217.35 | 220.97 | 100.38 | 1.49 |
| 1900 | 1873.77 | 19.19 | 105.53 | -47.76 | 247.90 | 252.46 | 100.90 | 1.73 |
| 2000 | 1967.71 | 20.85 | 106.16 | -57.19 | 280.84 | 286.60 | 101.51 | 1.67 |
| 2100 | 2060.24 | 23.68 | 104.40 | -67.00 | 317.43 | 324.42 | 101.92 | 2.91 |
| 2200 | 2151.18 | 25.52 | 98.92 | -75.33 | 358.17 | 366.01 | 101.88 | 2.93 |
| 2297 | 2238.00 | 27.44 | 95.49 | -80.71 | 401.07 | 409.11 | 101.38 | 2.45 |

Profundidades referidas a la RTE (6 ft) del taladro

Azimuth referidos al norte verdadero

Closure Calculated from Well Head Location

Horizontal Coordinates Calculated from Well Head Location

Calculation Method: MINIMUM CURVATURE

Registro Direccional Gyro

CONTROL DE CALIDAD

Serial Gyro : GT1-3258

Maxima temperatura del gyro (°F) : 96.2°

Declinación Magnética : -7.19848

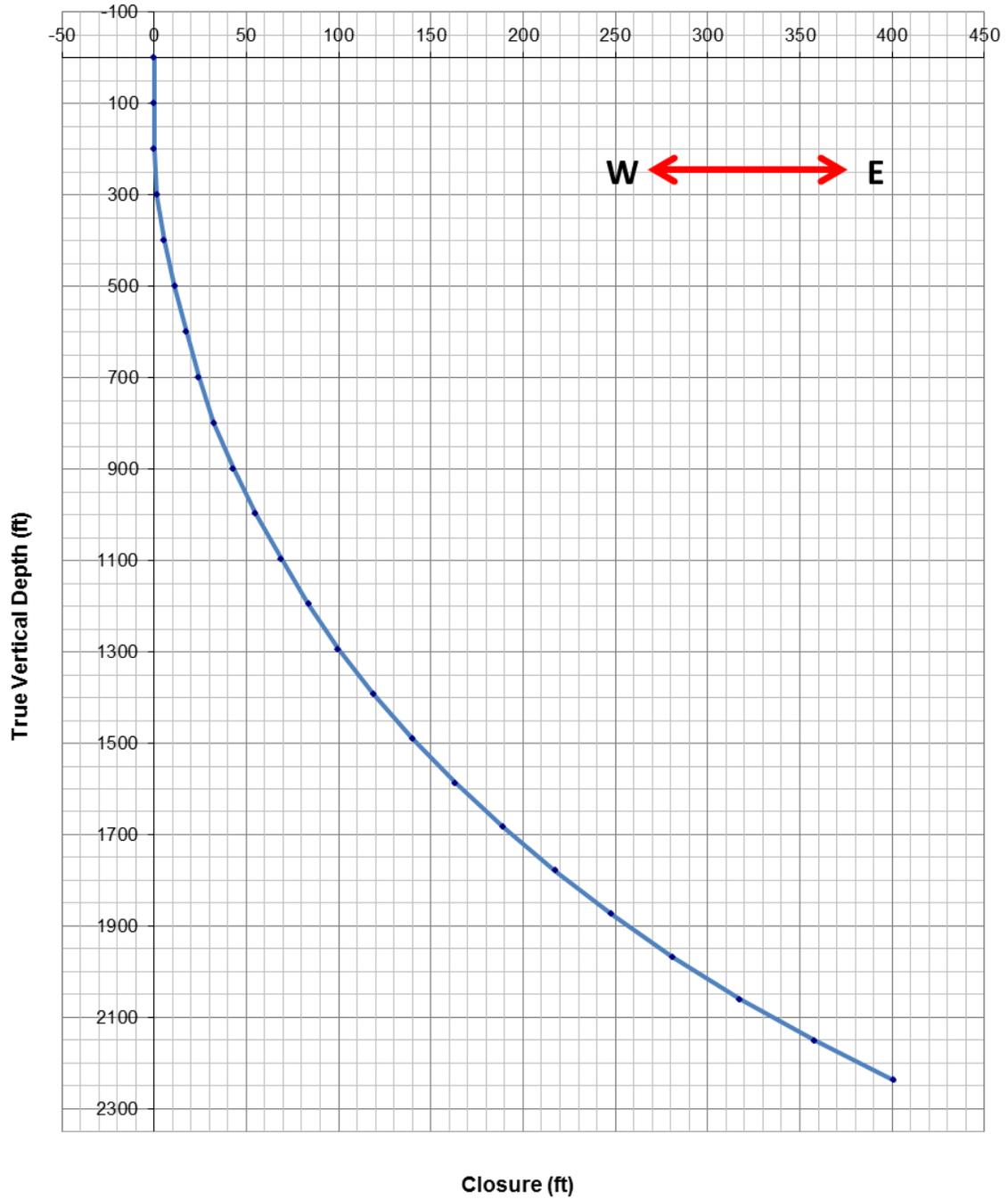
Se toman 5 lecturas de la herramienta a dos profundidades diferentes para verificar repetibilidad en inclinación y azimuth

| INCLINACION | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1500 | 12.90 | 12.91 | 12.90 | 12.90 | 12.90 |
| 2000 | 20.86 | 20.85 | 20.85 | 20.86 | 20.85 |

| AZIMUTH | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1500 | 103.83 | 103.83 | 103.85 | 103.91 | 103.38 |
| 2000 | 106.38 | 106.16 | 106.15 | 106.16 | 106.16 |

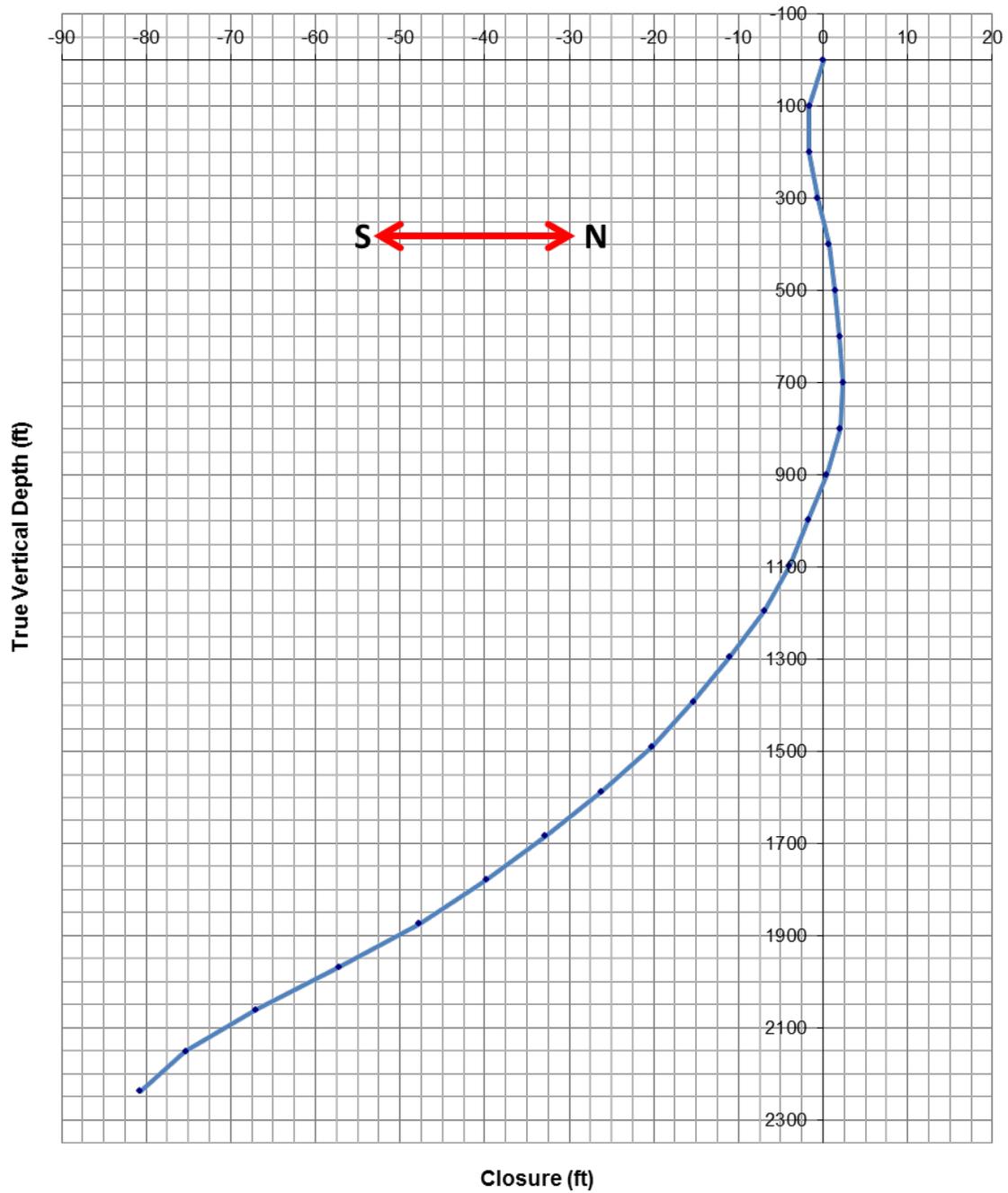
PERFIL DE VISTA OESTE-ESTE

Operadora : XXXXX
Pozo : XXXXX



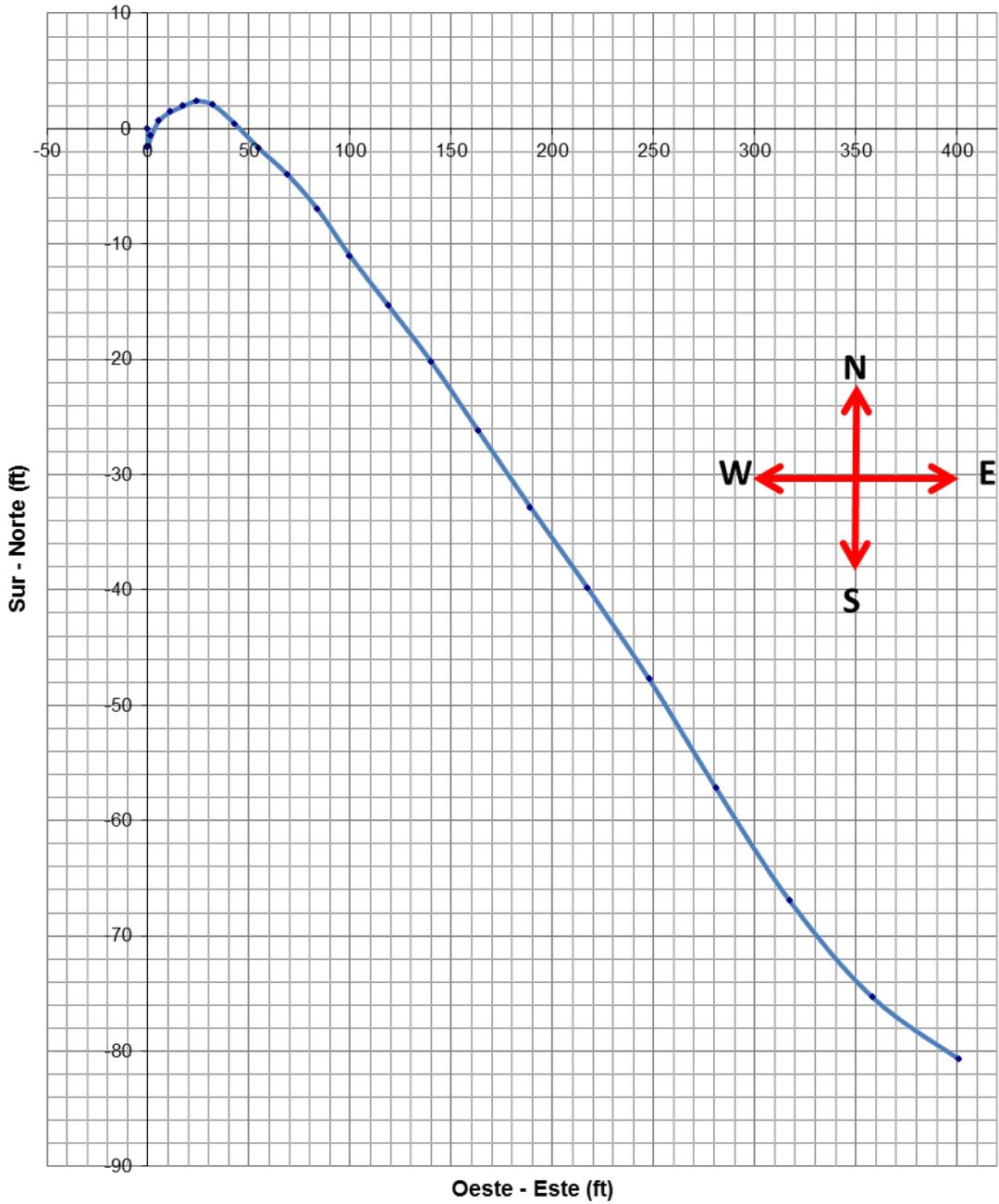
PERFIL DE VISTA NORTE-SUR

Operadora : XXXXX
Pozo : XXXXX



VISTA DE PLANTA

Operadora : XXXXXX
Pozo : XXXXX



ANEXO D TEORIA DE LOS ACELERÓMETROS

Principio básico de funcionamiento

Los acelerómetros son dispositivos para medir aceleración y vibración. Estos dispositivos convierten la aceleración de la gravedad o de movimiento en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido la vibración o aceleración. Esta señal analógica indica en tiempo real la aceleración instantánea del objeto sobre el cual el acelerómetro está montado.

Las técnicas convencionales para medir la aceleración se fundamentan en el primer principio descubierto por Newton y descritos en su Principio de Newton en 1687, el cual nos dice *“que la fuerza neta aplicada sobre un cuerpo es proporcional a la aceleración que adquiere dicho cuerpo”*.

La aceleración constante de una masa implica una fuerza $F = m * a$, donde F es la fuerza, a es la aceleración y m la masa. Tanto la fuerza como la aceleración son magnitudes vectoriales y, por lo tanto, tienen dirección y sentido.

Las unidades de medida de estas variables en el sistema internacional son:

- Fuerza en Newtons [N]
- Masa en kilogramos [Kg]
- Aceleración en metros por segundo al cuadrado [m/s²]

Los acelerómetros son sensores inerciales que miden la segunda derivada de la posición. Un acelerómetro mide la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad. Esta fuerza puede variar la tensión de un muelle, deformar un elemento, o modificar la frecuencia de vibración de una masa.

Los acelerómetros son direccionales, sólo miden la dirección en un eje. Para monitorear aceleración en tres dimensiones se emplean acelerómetros multi-ejes (ejes x, y, z), los cuales son ortogonales.

El principio básico de funcionamiento de los acelerómetros es la detección de la fuerza ejercida en una masa con limitación elástica.

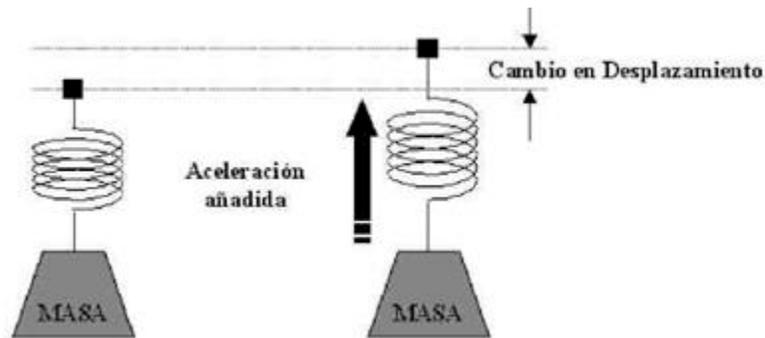


Figura 1: esquema básico del acelerómetro

Consideremos un sistema mecánico simple, que consiste en una masa fija m , con un muelle con una rigidez k (constante). Si la masa se desplaza una distancia x , la aceleración debido a la fuerza restauradora del muelle es $F=k*x$. Sustituyendo en la ecuación de Newton, encontramos que $a = k*x/m$ y podemos derivar la magnitud de la aceleración observando el desplazamiento x de la masa fija.

Este principio fundamental se utiliza hasta en el más sofisticado y caro acelerómetro electromecánico, e incluso en modernos acelerómetros micromecanizados.

Veamos el modelo de un acelerómetro formado por masa y resorte, e incluyendo el ruido intrínseco debido al *damping* (disminución progresiva de la amplitud del movimiento del muelle).

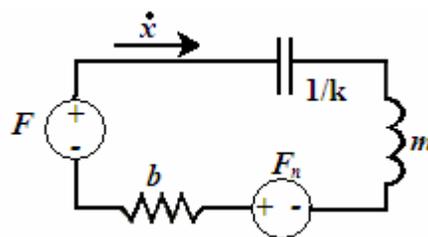


Figura 2: Modelo con masa y resorte elástico para un acelerómetro, con modelado del ruido interno

En la figura 2, F representa la fuerza externa y F_n la fuerza del ruido equivalente al ruido de Johnson en un resistor. La respuesta en velocidad de este sistema aplicando la transformada de Laplace sería:

$$\frac{dx}{dt} = sx = \frac{F + Fn}{ms + b + \frac{k}{s}} \quad (Ec. 01)$$

El desplazamiento de la fuerza resultante es:

$$x = \frac{(F + Fn)}{ms^2 + bs + k} \quad (Ec. 02)$$

Este sistema tiene una frecuencia de resonancia ω_0 igual a $\sqrt{k/m}$ y un factor de calidad Q igual a $m \omega_0/b$

Cuando se usa como acelerómetro, m es la masa de prueba y k la constante del muelle.

Un acelerómetro cuasi-estático es aquel en el que el movimiento de la masa de prueba sigue la evolución en el tiempo de la fuerza inercial aplicada sin retardos o atenuaciones significativos. Por lo tanto, el acelerómetro se diseña para obtener frecuencias de resonancia mucho mayores que la máxima esperada en la componente de la señal de aceleración. En este caso, podemos usar la respuesta cuasi-estática:

$$x = \frac{F + Fn}{k} \quad (Ec. 03)$$

Examinemos en primer lugar el término de la señal. La fuerza inercial F es igual a la masa de prueba m por la aceleración medida. Esto, junto con la definición de ω_0 , lleva a una de las características más importantes de los acelerómetros cuasi-estáticos: el desplazamiento y la aceleración son proporcionales al cuadrado de la frecuencia de resonancia:

$$x = \frac{a}{\omega_0^2} \quad (Ec. 04)$$

Esta ecuación conlleva importantes implicaciones. La más obvia es que el factor de escala depende sólo de la frecuencia de resonancia y no se ve afectada por la elección de una masa mayor y muelle poco flexible, o masa menor y un muelle más flexible. Sólo la razón interviene en la respuesta. La segunda implicación es que si se necesita fabricar un acelerómetro que responda rápidamente, por tanto tendrá una alta frecuencia de resonancia, entonces la amplitud de la señal de posición medida será pequeña. Por ejemplo, para un acelerómetro de 50 g (donde g es la aceleración de la gravedad) de la empresa Analog Devices, con una frecuencia de resonancia de 24.7 kHz, el máximo desplazamiento cuasi-estático de la masa de prueba es de 20 nm. De otro modo, si una frecuencia de resonancia de 1 kHz es admisible para la aplicación, el máximo desplazamiento llega a ser de 1.2 μm .

Consideremos ahora el ruido intrínseco debido al damping. La función de densidad espectral del ruido es $4kBT$, exactamente igual al ruido de Jonson en un resistor, donde kB es la constante de Boltzmann en julios por kelvin y T es la temperatura de la resistencia en kelvin . Es conocido como ruido de movimiento Browniano, aunque de hecho, la forma de la función de densidad espectral no depende del mecanismo que produce el damping.

Lo normal es convertir esto en aceleración; lo hacemos en dos pasos. Primero, hay que darse cuenta que en un ancho de banda de 1 Hz, la media del ruido es $\sqrt{4kBT\omega\Delta\omega}$. Para convertir esto en desplazamiento, dividimos por la constante del muelle k , y para convertir el desplazamiento en aceleración, multiplicamos por ω^2 . El resultado neto es que el ruido equivalente de la aceleración es

$$a_{n,rms} = \sqrt{\frac{4kBT\omega}{mQ}} \quad (Ec. 05)$$

Para un dispositivo con una frecuencia de resonancia de 24.7 kHz, una masa de prueba de 2.2×10^{-10} kg, y un factor de calidad Q de 5, el ruido de aceleración rms sería 4.83×10^{-3} m/(sec²- Hz), alrededor de 0.5mg/ Hz . Esto sugiere que es posible alcanzar grandes relaciones señal-ruido con acelerómetros.

En la práctica, la relación señal-ruido, y, por tanto, la sensibilidad de un acelerómetro, se ve dominada por otros aspectos: la contribución al ruido del circuito encargado de medir la posición, especialmente en la primera etapa de amplificación; la necesidad de construir resortes adicionales en la estructura (incrementando su frecuencia de resonancia) para prevenir tanto el pegado de partes durante la fabricación como exceso de fragilidad; o errores de calibración y problemas de derivas.

Observando la ecuación en el dominio del tiempo se observa que la deformación del resorte es aproximadamente proporcional a la aceleración. De esta forma, **podemos medir la aceleración a partir de la deformación.**

Igualmente podemos expresarlo con ecuaciones diferenciales. Partiendo de la expresión de la segunda ley de Newton empleada en mecánica:

$$b = \frac{B}{K} m \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - F = 0 \quad (Ec. 06)$$

Y representando la fricción en el sistema como un pequeño amortiguador:

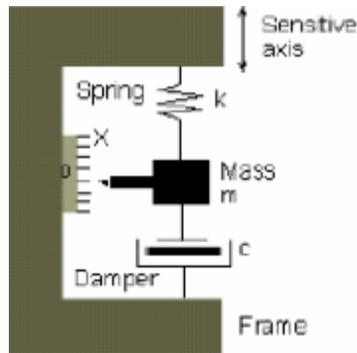


Figura 3: representación sistema mecánico

Las ecuaciones quedarían:

$$F = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + C \frac{dy}{dt} + kx \quad (\text{Ec. } 07)$$

Clases de acelerómetros

Existen diferentes tipos de acelerómetros según la tecnología: mecánicos, capacitivos, piezoeléctricos, piezoresistivos y micromecanizados (MEMS).

Acelerómetros mecánicos

Emplean una masa inerte y resortes elásticos. Los cambios se miden con galgas extensiométricos (matriz de bobinas o cable muy fino que varían sus resistencias linealmente en función de la carga aplicada al dispositivo), incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación. También se emplean en sistemas rotativos desequilibrados que originan movimientos oscilatorios cuando están sometidos a aceleración (servoacelerómetros) o detectan el desplazamiento de una masa inerte mediante cambios en la transferencia de calor (acelerómetros térmicos).

Acelerómetros piezoeléctricos

El principio de funcionamiento de estos acelerómetros se basa en las propiedades de los cristales piezoeléctricos. Al sufrir una deformación física el cristal, se modifica su estructura cristalina y así cambian también sus características eléctricas. Producen una corriente eléctrica al verse sometidos a la acción de una fuerza. Midiendo esta corriente podremos calcular la aceleración. Entre estos materiales se encuentran, por ejemplo, el cuarzo y la sal.

El principal inconveniente radica en la frecuencia máxima de trabajo, no muy elevada, y en la incapacidad de mantener un nivel permanente de salida ante una entrada común.

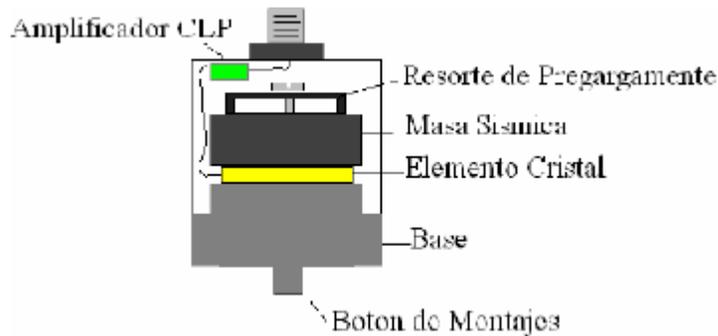


Figura 4: Sensor piezoeléctrico

En la siguiente figura se muestra el circuito equivalente para el acelerómetro piezoeléctrico indicando la sensibilidad del sistema a la aceleración en función de los parámetros del sistema:

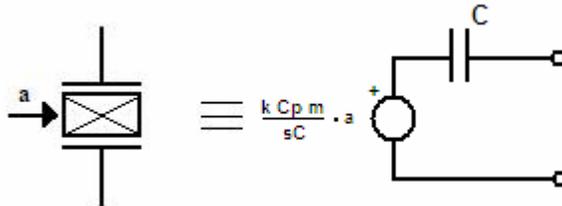


Figura 5: Circuito equivalente sensor piezoeléctrico

Actualmente podemos encontrar muchos tipos de acelerómetros según su sensibilidad, frecuencia de uso, etc. Pero la principal distinción entre ellos viene dada por la incorporación o no de un amplificador de carga.

Al incorporar una etapa amplificadora de carga tienen la ventaja que producen un valor de tensión proporcional a la excitación aplicada en la salida del amplificador, por tanto su comportamiento resulta independiente del conexionado exterior, puesto que carga y resistencia de entrada del amplificador se mantienen constantes siempre. A cambio, necesitan ser alimentados; de todas formas su empleo está muy extendido debido a sus ventajas y comodidad de uso.

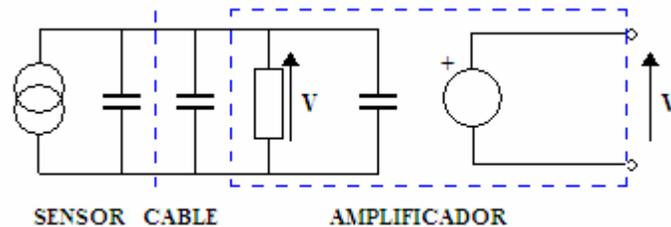


Figura 6: Sensor piezoeléctrico con etapa amplificadora

Los sensores que no incorporan dicha etapa amplificadora carecen de una salida tan cómoda precisamente porque sólo incorporan el sensor.

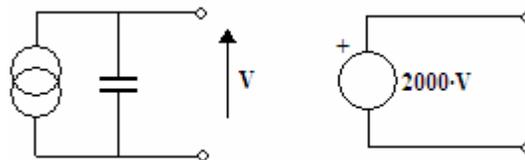


Figura 7: Sensor piezoeléctrico sin etapa amplificadora

Acelerómetros piezoresistivos

Su funcionamiento se basa en la propiedad de las resistencias eléctricas de cambiar su valor cuando el material se deforma mecánicamente. En lugar de tener un cristal piezoeléctrico, como los anteriores sensores, tienen sustrato formando parte de un circuito que mide la intensidad de corriente mediante un puente de Wheatstone. Según el tipo de material y su dopado, así variará el valor de la resistencia.

La respuesta de frecuencia llega hasta los 0 Hz.

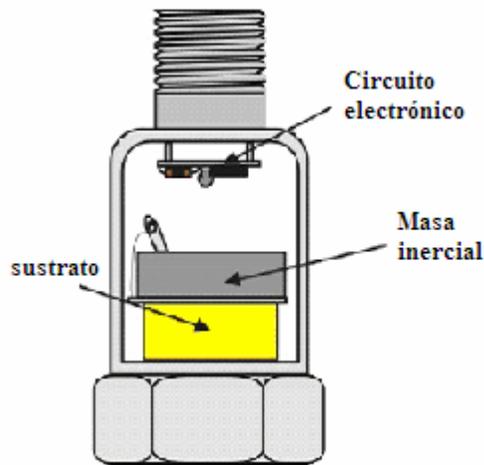


Figura 8: sensor piezoresis

Acelerómetros capacitivos

Estos dispositivos varían la posición relativa de las placas de un microcondensador cuando se encuentra sometido a aceleraciones.

Están integrados en chips de silicio, que les proporcionan soluciones a diferentes tipos problemas, por ejemplo, cuestiones de humedad, temperatura, capacidades parásitas, número total de terminales, etc.).

De todos los métodos existentes para realizar medidas de posición, la medida de los cambios en el valor de una capacidad es la más versátil. Algunos tipos de condensadores de empleo común:

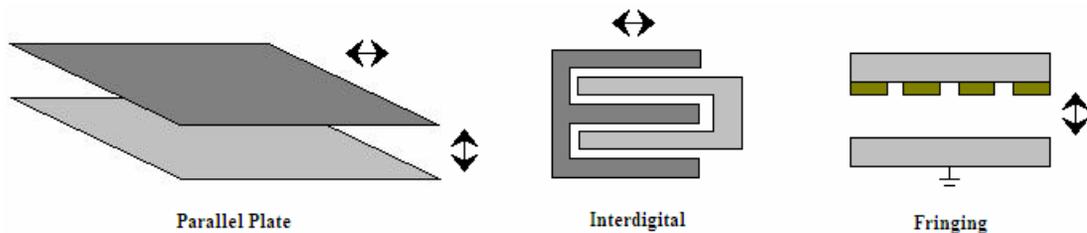


Figura 9: Variedad de estructuras de condensadores usados para medir posición

Estos sensores se encuentran formados por un conjunto de electrodos fijos (anclados al circuito) y una serie de placas unidas a la masa de prueba, que sólo están sujetas al sustrato por sus extremos de forma que tengan cierta libertad de movimiento. Con el siguiente dibujo lo vemos más claramente:

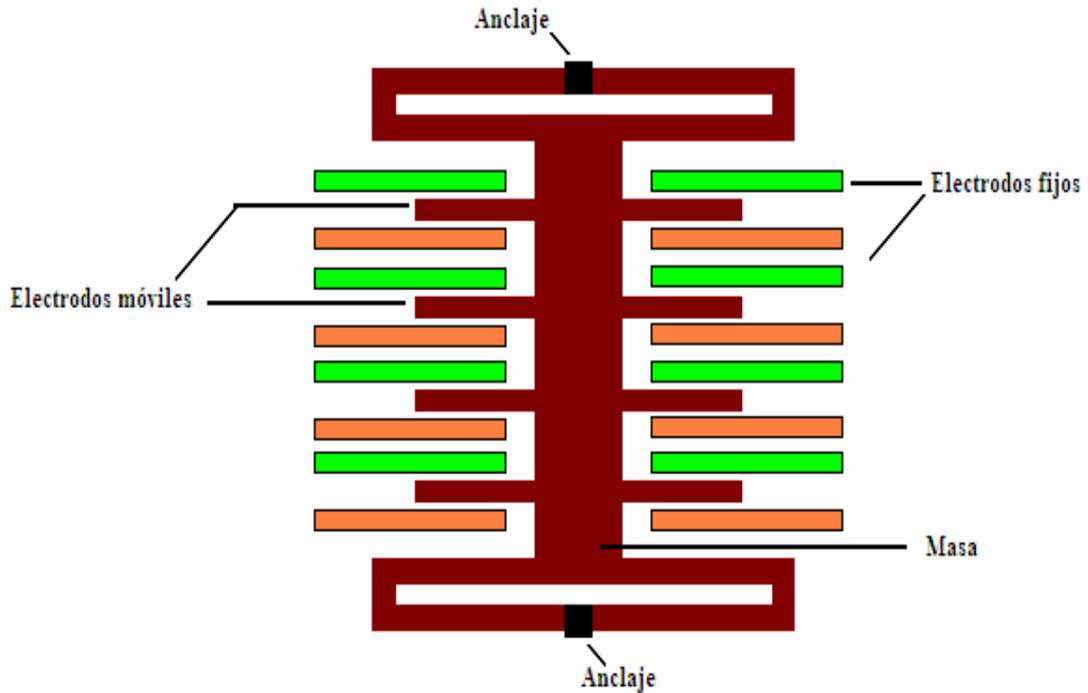


Figura 10: Esquema de un sensor capacitivo

En reposo cada electrodo móvil se encuentra justo entre dos electrodos fijos, así todas las capacidades tienen el mismo valor. Al aplicar una fuerza externa, la masa central se moverá, desplazándose también los electrodos adheridos a ella y de manera que una de las capacidades aumente y la otra disminuya.

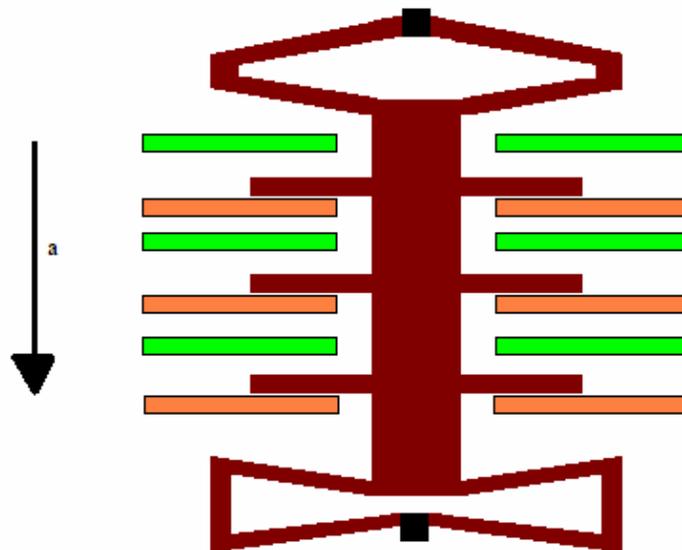


Figura 11: Esquema exagerado del efecto que tendría una fuerza sobre el sensor

Acelerómetros micromecanizados (MEMS)

Se denomina MEMS (MicroElectroMechanical Systems) o microsistemas electromecánicos a una tecnología de base que se utiliza para crear dispositivos diminutos. Este tamaño puede oscilar en pocas micras pudiendo llegar hasta un milímetro de diámetro.

Las primeras investigaciones con tecnología MEMS se realizaron en los años 60 pero no fue hasta los años 90 cuando se realizaron los primeros avances a lo que a comercialización y utilización se refieren.

En este sentido la industria automovilística fue pionera. El fin era desarrollar e implementar detectores de colisiones mediante esta tecnología y de esta forma se pudo crear el famoso sistema de protección denominado “air bag” utilizado hoy en día en cualquier tipo de automóvil.

En esta misma década otro tipo de industrias (de las que podemos destacar la médica entre todas ellas) vieron el potencial de la tecnología MEMS la cual permitía reducir de forma considerable las dimensiones de los sistemas como también el propio coste de los mismos.

Para esta tecnología se utiliza un sistema de unidades reconocido a nivel internacional el denominado μMKSV . Este sistema de unidades esta formado por un conjunto sistemas de unidades ya conocidos, es decir, al integrar esta tecnología características eléctricas y mecánicas utiliza diferentes magnitudes de medida.

Por tanto como unidad básica de medida de longitud tenemos el micrómetro de ahí la primera sigla “ μM ”, para las unidades de peso tenemos el kilogramo “K”, para las de tiempo el segundo “S” y para las unidades Eléctricas el voltio “V”.

La fabricación de MEMS es muy compleja, a veces con cientos de diferentes medidas. Cada paso debe ser controlado por una docena o más de parámetros, como temperatura, presión y composición química.

Una diferencia de cinco grados Celsius puede tener poco efecto en la producción de chips de silicio, ya que sólo dependen de las propiedades eléctricas del material.

MEMS, sin embargo, también tienen propiedades mecánicas. Una pequeña variación de cualquier parámetro en la fabricación en cualquier etapa podría alterar el rendimiento del producto final.

Por lo general, estos mecanismos tienen un tamaño mayor al micrómetro (millonésima de metro) y menor al milímetro. Lo que los hace tan particulares es que, a estas escalas, el comportamiento físico que rige a las maquinas convencionales no siempre funciona como la intuición puede indicar.

Efectivamente, el incremento en la relación entre la superficie y el volumen de las piezas de un MEMS hace que los efectos electrostáticos y térmicos predominen sobre la inercia o la masa térmica.



Figura 12: chip de 2mm², sensor MEMS de 400μm², brazos de 1μm

Para fabricar las pequeñas piezas que conforman estas máquinas se utiliza una tecnología que, en esencia, es la misma que la empleada para la fabricación de los circuitos integrados. La posibilidad de “integrar” piezas móviles es lo que ha hecho posibles máquinas a escala nanométrica. Existen motores a vapor del tamaño de un grano de polen, engranajes y palancas cuyo tamaño mide en diámetros atómicos, y hasta pequeños espejos montados sobre soportes móviles, con un tamaño mucho menor al diámetro de un cabello, capaces de enfocar o corregir una imagen.

Aplicaciones de los acelerómetros

La aceleración es una magnitud física fundamental, manifestada de muchas maneras (gravedad, vibración, actividad sísmica y en este caso de estudio inclinación). La medición de la aceleración de forma continua, exacta y a bajo coste, abre numerosas aplicaciones para los acelerómetros.

Los fabricantes de ordenadores portátiles, por ejemplo, constantemente buscan formas de hacer sus productos más seguros. Los elementos más dispuestos a dañarse son los dispositivos de almacenamiento masivo (con la consecuente pérdida de información), discos duros particularmente. El mecanismo que lee y escribe información a los discos flota sobre los discos; un movimiento repentino puede provocar fácilmente un problema, destruyéndose igualmente la información. Un acelerómetro puede detectar este movimiento y permitir contrarrestar los choques, salvando así la información.

Similar aplicación podrían tener en el transporte de paquetes frágiles y delicados, en los que cualquier movimiento o golpe externo puede romper el

contenido; prevenir estos golpes tal vez sea inevitable, pero así se podría saber con exactitud el momento en que se produjo y el porqué.

Las aplicaciones militares incluyen sistemas de detonación para misiles y bombas. En este caso un acelerómetro forma parte del sistema difuso, la detección de impacto por la rápida desaceleración asociada. La continua variación de salida del acelerómetro sería rápidamente analizada, estableciendo el instante preciso en que la carga explosiva debe ser detonada y producir el daño máximo sobre el objetivo.

También puede ser utilizado para monitorizar máquinas de salud, máquinas de rotación para mostrar las características de vibración; grietas o fatigas de las máquinas; monitorizando continuamente la vibración de una máquina es posible avisar de algún fallo inminente. Las aplicaciones varían según el tipo de máquina: aeronaves, sistemas de calentamiento, de ventilación y aire acondicionado.

Este tipo de sensores es muy importante; la información de la aceleración sufrida por un objeto o parte de un robot es de vital importancia, ya que si se produce una aceleración en un objeto, este experimenta una fuerza que tiende a poner el objeto en movimiento.

Los MEMS permiten cada día la creación de dispositivos sorprendentes. Por ejemplo, para evitar la falsificación de una firma, es posible incorporar acelerómetros en un bolígrafo o una pluma, para que además de escribir sea capaz de registrar las velocidades y aceleraciones que le imprimió la mano mientras se firmaba. Esto hace prácticamente imposible una falsificación.

Veamos algunas de estas aplicaciones de manera algo más concreta:

Acelerómetros de baja frecuencia

La medición en baja frecuencia es crítica en varias actividades industriales. Las industrias petroquímica, de máquinas de herramientas y de papel usan mediciones en baja frecuencia para monitorizar condiciones de funcionamiento y hacer mediciones de procesos.

Acelerómetros de alta frecuencia

Los acelerómetros de alta frecuencia se utilizan en maquinaria con mecanismos de engranajes o pequeños rodamientos, tales como herramientas de alta velocidad o compresores.

Transductores sísmicos

Combinan un acelerómetro piezoeléctrico súper sensible, un amplificador de ultra bajo ruido y un excelente aislamiento eléctrico/mecánico, son utilizados en baja frecuencia (menos de 100 Hz).

Acelerómetros submarinos

Los acelerómetros subacuáticos son resistentes a la corrosión galvánica y son construidos para resistir las altas presiones propias de las profundidades.

Acelerómetros para helicópteros

Un helicóptero, al fin y al cabo, es una aeronave con alas rotatorias. A diferencia de las aeronaves de ala fija, el rotor proporciona tanto la elevación como el desplazamiento. La empresa Wilcoxon fabrica sensores especialmente diseñados para monitorizar el correcto funcionamiento del helicóptero.

Acelerómetros 3D para ordenadores portátiles

El sensor de aceleración 3D es un monitor de movimiento completo de 3 ejes capaz de detectar la caída libre en todas las direcciones con la misma intensidad. Esta capacidad de supervisión filtra con exactitud los pequeños movimientos de inclinación y detecta las vibraciones repentinas.

Si se detecta una posible caída, se descarga el cabezal de la unidad de disco duro. En este proceso, el cabezal se aleja del soporte, lo que reduce la posibilidad de daños. Cuando el equipo portátil recupera la estabilidad, el cabezal vuelve a su posición normal.

El nivel de protección aumenta temporalmente 10 segundos después de que se produzcan acciones como cerrar la pantalla LCD o desconectar el aparato de CA, ya que se supone que se va a recoger en breve. La sensibilidad 3D también sube en cuanto aumenta el ángulo de inclinación.

Acelerometría dinámica

En la valoración de los trastornos de movimiento en pacientes con enfermedades neurodegenerativas es esencial contar con un sistema que permita la descripción cuantitativa del movimiento en diversas condiciones. Una posible fuente de esta información es la acelerometría dinámica, basada en el uso de sensores capacitivos integrados del tipo MEMS, que detectan simultáneamente la posición espacial y el cambio de velocidad.

Ciertas familias de acelerómetros dinámicos, como la ADXL de Analog Devices, incluyen dispositivos de dos y tres ejes con salidas digitales en forma de pulsos cuadrados con modulación de anchura de pulso, donde el inicio del trabajo es proporcional a la aceleración detectada.

Otros ejemplos comerciales

- **Nintendo Wii**

Una de las consolas más revolucionarias de la historia de los videojuegos se basa en la utilización de un mando dotado de un acelerómetro que detecta los movimientos del usuario, dando una sensación de realismo al usuario que deja totalmente desfasado a los botones y joysticks.

Este acelerómetro en concreto es el ADXL330 de la empresa Analog Devices, elegido por su capacidad de capturar movimientos en tres dimensiones (acelerómetro triaxial), por su reducido tamaño (cabe en el mando de la consola) y por su bajo consumo, pues se alimenta con dos pequeñas pilas tipo AA.

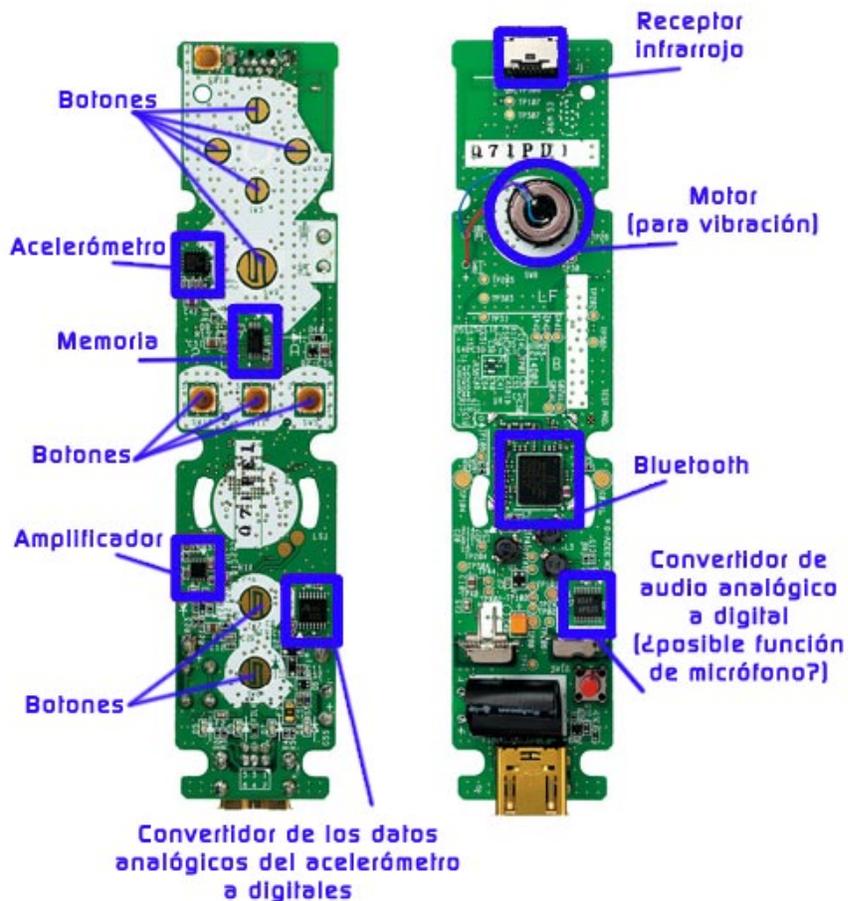


Figura 13: Acelerómetros aplicados en Nintendo wii

- **Crash test dummies**

En los tests de accidente que se realizan a los automóviles se utilizan unos muñecos especiales que están diseñados para poder estudiar los daños que sufriría una persona normal, para ellos es vital saber la desaceleración a la que se somete el cuerpo en distintas partes. Aquí es donde entra en juego el uso de los acelerómetros.

Uno de los modelos de acelerómetro específicamente utilizados para esta tarea es fabricado por la empresa PCB Piezotronics, diseñado para medir impactos severos, puede medir una desaceleración de hasta 2000 G y de pequeño para poder ser insertado en cualquier parte del muñeco.



Figura 14: Acelerómetros aplicados en crash test dummies

- **Automoción**

Los acelerómetros se utilizan ampliamente en la industria automovilística hoy en día. Cualquier automóvil equipado con un control electrónico de tracción y estabilidad (EBTCM) se vale entre otros sensores de un acelerómetro que mide la aceleración lateral que sufre el vehículo.

El sistema lee la aceleración lateral, la posición del volante y la velocidad de las ruedas para calcular la reacción que debe dar el sistema para mantener la estabilidad del vehículo. Serían capaces de medir aceleraciones de $\pm 3G$, y su resistencia a choques llega a ser de 20 000 G. Constan un sistema de detección de fallos constante, pues en este caso un fallo puede tener consecuencias fatales.



Figura 15: Acelerómetro capacitivo triaxial miniatura K-Beam de alta sensibilidad

CARACTERISTICAS DE LOS ACELERÓMETROS MEMS

Dos parámetros principales a la hora de escoger el sensor adecuado son los rangos de funcionamiento de temperatura y frecuencia, tomando en cuenta también el tamaño, gravedad, resistencia a golpes y el precio. La correcta elección depende de la eficiencia y utilidad que se obtiene como resultado de usar determinado acelerómetro.

- **SENSIBILIDAD**

La sensibilidad de los acelerómetros permite saber la cantidad de medida que percibe el sensor en función de la magnitud física que se aplica sobre el dispositivo. Esta cantidad de medida es el valor de voltaje que el acelerómetro proporciona por cada unidad de gravedad aplicada (mV/g). Donde mV (unidad eléctrica que se utiliza) con respecto a la magnitud física que en este caso es la aceleración en g ($1g = 9.81m/s^2$)

En los acelerómetros digitales la sensibilidad se mide en LSB/mg .

El valor de sensibilidad se asocia generalmente con un intervalo de frecuencia y amplitud. De esta manera en un mismo acelerómetro la sensibilidad suele ser distinta, dependiendo de las características del movimiento y de parámetros ambientales como la temperatura; por ejemplo: $100mV/g$ a una frecuencia de 100Hz para un nivel de aceleración pico de: 1g a 24°C.

- **LSB (Least Significant Bit)**

El LSB es la variación de voltaje que produce un cambio en una unidad en la salida del ADC, o también se determina, como el rango de voltaje designado a cada bit. Su valor depende del rango máximo de voltaje y del número de bits del ADC.

- **RESOLUCIÓN**

Nivel más bajo de gravedad que el acelerómetro es capaz de medir. Es decir el cambio más pequeño en la entrada que es detectada a la salida, esta relacionada con el voltaje sobre la unidad de gravedad V/g .

Para sensores puramente analógicos este parámetro es infinito, mientras que en aquellos que implementa circuitos digitales con sus respectivos conversores ADC la resolución está en función del número de bits utilizados para el proceso.

$$Resolución = 1LSB = V / 2^{n \text{ bits}}$$

- **ANCHO DE BANDA**

Es el rango de frecuencia máxima que mide un dispositivo, indicando cómo este responde a frecuencias diferentes. A mayor ancho de banda los sensores miden la frecuencia más alta de movimiento y vibración.

- **RANGO DE MEDIDA**

Se refiere a la cantidad de gravedades que el dispositivo cuenta y la medida máxima que soporta el sensor. Para los acelerómetros el rango de medida se evalúa con la gravedad estándar $g = 9.8 \text{ m/s}^2$. Existen acelerómetros de 1.5g, 2g, 4g, etc. El nivel de rango de medida determina la sensibilidad, a mayor rango, menor sensibilidad.

ANEXO E. TEORIA DE GIROSCOPOS

El giróscopo es un dispositivo que permite conocer como varia un ángulo en el tiempo, mientras este se encuentra rotando (velocidad angular), con esto es posible determinar la actitud del móvil en el cual se encuentra montado.

Los giroscopios antiguamente por su tamaño, peso y carácter mecánico tenían limitadas aplicaciones, siendo esencialmente utilizados en aplicaciones militares.

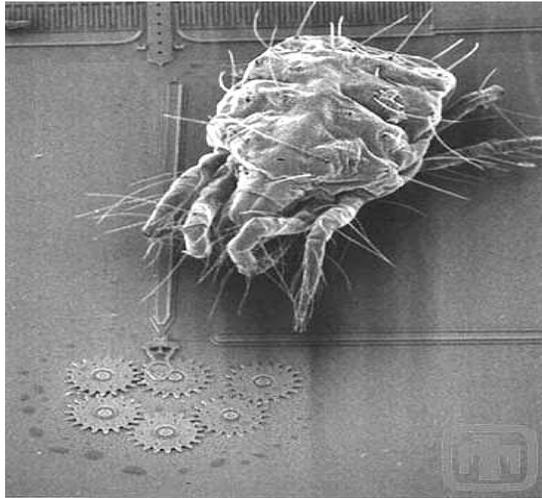


Figura 16: Un ácaro cerca de un grupo de engranajes producidos utilizando MENS



Figura 17: Giroscopio y acelerometro producido por Analog Device

Gracias a la tecnología MEMS, el tamaño y peso de este dispositivo ya no más un problema, dándoles gran versatilidad en cuanto a su uso, que puede ir desde aplicaciones para estabilización de plataformas, así como también sistemas INS (inertial navigation system), siendo esta aplicación una de las más importantes en la actualidad.

Los Sistemas Micro Electro-Mecánicos por sus siglas en ingles MEMS, son aquellos que funcionan en base a componentes electrónicos mecánicos miniaturizados, dando origen así a dispositivos capaces de sensor y actuar a una escala micrométrica.

PRINCIPIO BASICO DE FUNCIONAMIENTO

Existen tres principios básicos de funcionamiento:

- a) Rotatorios: Este principio utiliza una masa rotando sobre un eje sostenido por uno o varios cardanes (gimbals) dependiendo de los grados de libertad que se deseen, de tal manera que la presión sea mínima, manteniendo así el eje estable y por lo tanto el giróscopo apuntará siempre en la misma dirección. Cuando se produce un movimiento en el sistema externo es posible observar el cambio en el ángulo.

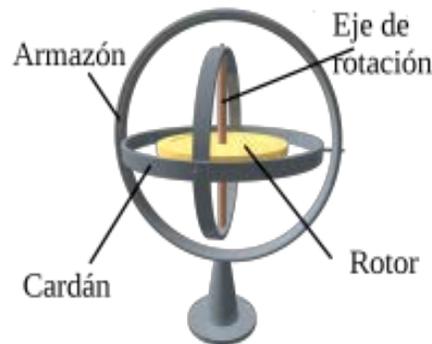


Figura 18: sistema de cardanes y giróscopos con dos grados de libertad

- b) Vibratorios: Se caracterizan por disponer de un elemento vibrante que al forzarlo a rotar, es afectado por una fuerza de Coriolis que induce vibraciones secundarias ortogonales a la vibración original. La velocidad angular se obtiene en base a dichas vibraciones.

Los giróscopos electrónicos se basan la fuerza de Coriolis, descrito en 1835 por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis, es el efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación (y por tanto no inercial) cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia. Este efecto consiste en la existencia de una aceleración relativa del cuerpo en dicho sistema en rotación. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de rotación del sistema y a la velocidad del cuerpo. El efecto Coriolis hace que un objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotación tienda a acelerarse con respecto a ese disco según si el movimiento es hacia el eje de giro o alejándose de éste. Debido a que el objeto sufre una aceleración desde el punto de vista del observador en rotación, es como si para éste existiera una fuerza sobre el objeto que lo acelera. A esta fuerza se la llama fuerza de Coriolis, y no es una fuerza real en el sentido de que no hay nada que la produzca. Se trata pues de una fuerza inercial o ficticia, que se introduce para explicar, desde el punto de vista del sistema en rotación, la aceleración del cuerpo, cuyo origen está en realidad, en el hecho de que el sistema de observación está rotando.

La fuerza de Coriolis es una fuerza ficticia que aparece cuando un cuerpo está en movimiento con respecto a un sistema en rotación y se describe su movimiento en ese referencial. La fuerza de Coriolis es diferente de la fuerza centrífuga. La fuerza de Coriolis siempre es perpendicular a la dirección del eje de rotación del sistema y a la dirección del movimiento del cuerpo vista desde el sistema en rotación. La fuerza de Coriolis tiene dos componentes:

- una componente tangencial, debido a la componente radial del movimiento del cuerpo, y
- una componente radial, debida a la componente tangencial del movimiento del cuerpo.

La componente del movimiento del cuerpo paralela al eje de rotación no engendra fuerza de Coriolis.

El valor de la fuerza de Coriolis F_c es:

$$F_c = -2m(w \times v) \quad (Ec. 08)$$

Donde:

- m , es la masa del cuerpo.
- v , es la velocidad del cuerpo en el sistema de rotación
- w , es la velocidad angular del sistema en rotación vista desde un sistema inercial.
- \times , indica producto vectorial

En la siguiente figura observamos un experimento donde podemos ver un disco que gira, con una velocidad angular w , respecto a un eje perpendicular a la superficie del disco. En la superficie del disco se encuentra una bola de masa m , que se desplaza a una velocidad v , en la dirección que se observa en la figura, en ésta podemos observar la trayectoria seguida por la bola en la superficie del disco debido al efecto de las fuerzas de Coriolis.

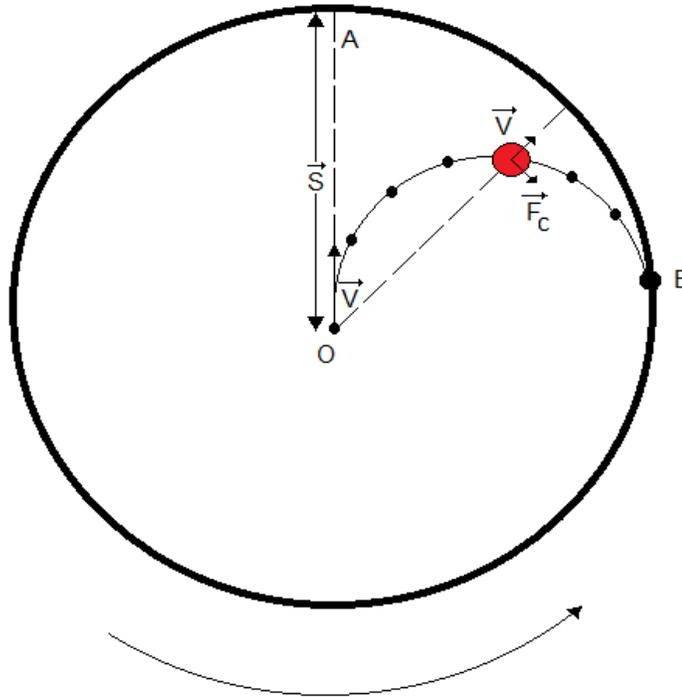


Figura 19: Explicación de la fuerza de Coriolis

Si el efecto de las fuerzas de Coriolis la bola partiría de O hasta A, debido a estas fuerzas la bola acabaría en B.

- c) **Ópticos:** Los giroscopios ópticos usan Sagnac para detectar la rotación a la cual están siendo sometidos. Cuando dos rayos de luz circulan en direcciones opuestas dentro de un camino cerrado, el haz de luz que circula en la misma dirección de la rotación tarda mas tiempo en viajar que el haz de luz que va en sentido contrario, con lo cual en ángulo se puede obtener en base a la diferencia de camino que ven los dos rayos que viajan en direcciones opuestas a lo largo del perímetro.

CLASES DE GIROSCOPOS

Hay algunas clases de giroscopios que operan siguiendo diferentes principios pero en general son agrupados en tres principales categorías como son los giroscopios mecánicos, ópticos y vibratorios.

✚ GIROSCOPIOS ROTATORIOS MECÁNICOS

También conocidos como giroscopio mecánico de Foucault, se basa en una masa rotando sobre un eje sostenida por varios cardanes (gimbals) o sistema mecánico que le permite total libertad de rotación. En la figura xx se muestra una configuración típica de este modelo de giróscopo.

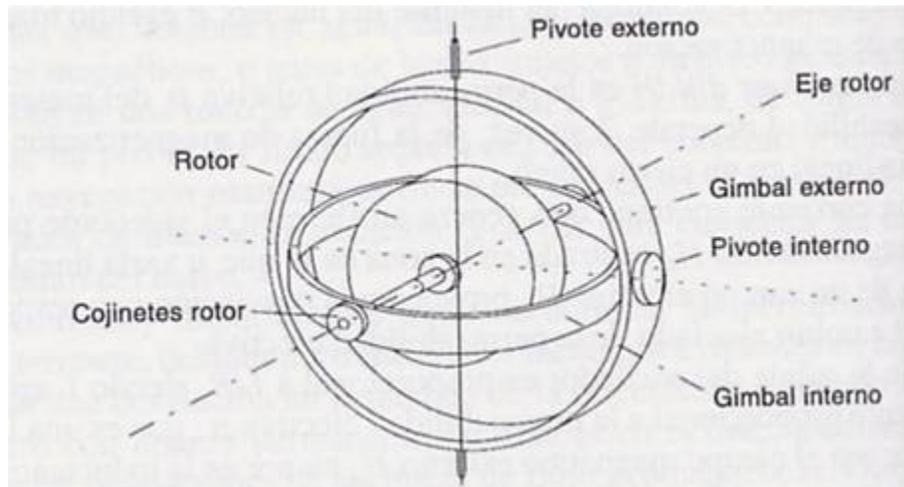


Figura 20: Componentes de un giroscopio mecánico

El rotor es accionado mediante un motor eléctrico, suspendiéndose mediante un par de cojinetes que deben ser de bajo rozamiento en cada extremo del eje. Estos cojinetes están soportados por un anillo circular, conocido como anillo gimbal interno, el cual, a su vez, pivota en un segundo juego de cojinetes que están unidos rígidamente a un anillo gimbal externo. Nótese que existen tres ejes: el eje de rotación del volante, o rotor, un eje perpendicular al de rotación del volante, que define el pivote interno, horizontal en la figura anterior, y un tercer eje perpendicular a los dos anteriores que define el pivote externo, vertical en la figura anterior.

Una propiedad importante de los giróscopos es que si en la rueda que gira se le aplica un par de fuerzas perpendicular al eje, tendiendo a volcarla, se

aprecia el fenómeno, en principio sorprendente, de que la rueda adquiere un lento movimiento de rotación, pero no alrededor del eje del par aplicado, sino alrededor del otro eje perpendicular a él y al eje de giro de la rueda. Este movimiento, al cual se conoce con el nombre de movimiento de precesión, se mantiene mientras existe la inercia giroscópica. Esta propiedad también se puede usar para la medida del ángulo girado.

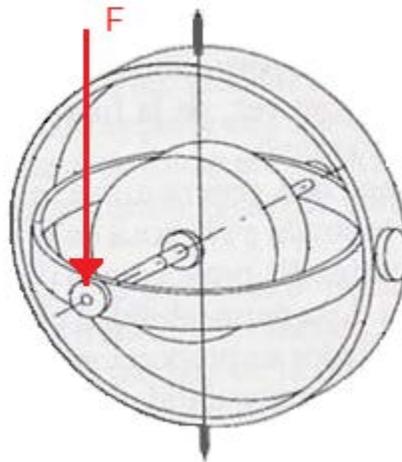


Figura 21: Aplicación de una fuerza vertical en el rotor

Así si se aplica una fuerza vertical hacia abajo en el extremo de eje del rotor (Figura 18), se produce un par en el eje horizontal que origina un movimiento de precesión de rotación alrededor del eje vertical. Si a la vez gira la base del instrumento sobre el mismo eje vertical existirá una relación entre el movimiento de precesión y la velocidad de giro de la base. En efecto, cuanto más rápido gire la base, mayor fuerza es necesaria para la precesión y la velocidad de giro de la base. Esta relación proporcional puede emplearse para medir la velocidad de giro sobre el eje vertical. Asimismo si en un barco se coloca el rotor del giroscopio en una dirección perpendicular al eje longitudinal del barco se mediría la variación en el ángulo de alabeo (roll) o rotación sobre el eje longitudinal del barco. Conviene resaltar que este giroscopio proporciona la variación de ángulo de rotación de un eje perpendicular al eje del rotor.

Giróscopos ópticos

La medición de rotación es de considerable interés en un gran número de áreas. Los más populares métodos de medición de la rotación usados en las décadas pasadas, se basan en el giroscopio mecánico, el que, como ya se ha comentado, depende del momento angular generado por una rueda o bola, a la cual se le imprime un movimiento rotativo.

El principio por el que se basa un giróscopo laser es el llamado efecto Sagnac. Las principales ventajas de los giróscopos ópticos sobre los mecánicos, básicamente son:

- No posee partes móviles
- No es necesario tiempo de calentamiento
- No son sensibles a la gravedad
- Gran rango dinámico
- Lectura digital
- Bajo costo
- Tamaño reducido

Por el contrario, el inconveniente que tienen este tipo de giróscopos es que son bastante frágiles.

Existen dos tipos de giróscopos ópticos: los RLG (Ring Laser Gyro) en los que el medio por el que circula el rayo de luz es un anillo de fibra, y los FOG (Fiber Optic Gyro) en los que el medio es una espiral de fibra óptica. Independientemente del tipo que se tenga el principio por el que se rigen ambos es el mismo: el efecto Sagnac.

Efecto Sagnac en el vacío

El principio en el que se basa este efecto es en la diferencia de camino recorrido por dos haces luminosos dentro de un recorrido de fibra óptica.

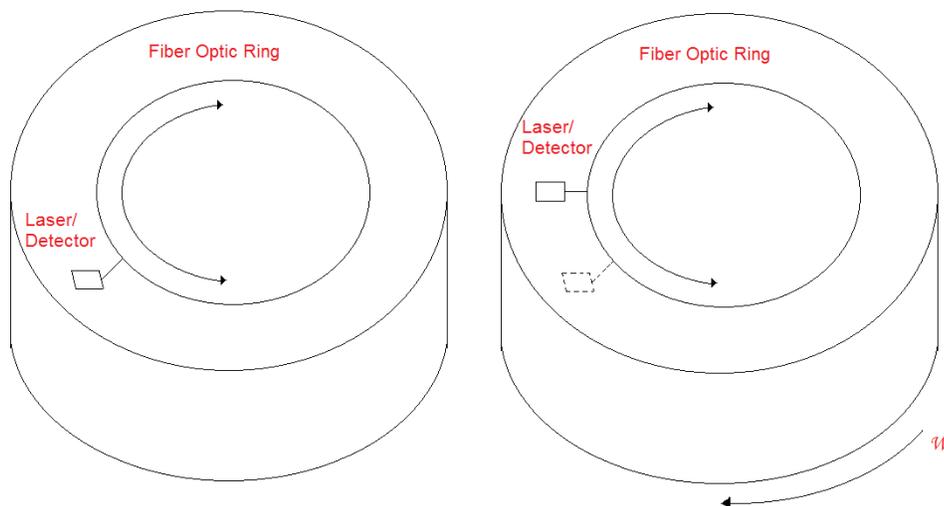


Figura 22: Estructura y componentes de RLG

Se va a intentar analizar el principio de funcionamiento. Para ello se parte de un disco de radio R rotando a una velocidad omega (ver Figura 22).

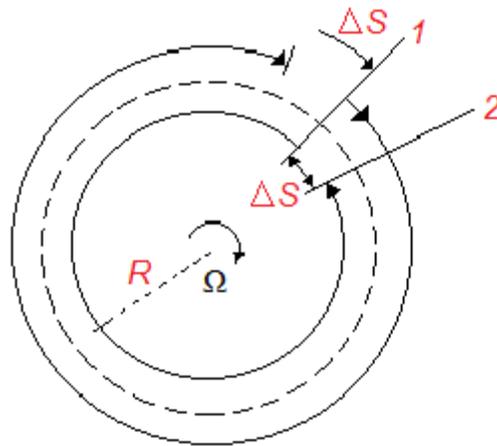


Figura 23: Recorrido de los dos rayos lumínicos

La diferencia de camino que ven dos rayos lumínicos viajando en direcciones opuestas, a lo largo del perímetro es de:

$$\Delta L = \left(4 * \frac{A}{c}\right) * \Omega \quad (Ec. 09)$$

donde A es el área encerrada por el camino y c es la velocidad de la luz. La derivación de esta ecuación se basa en la propagación de la luz en un campo rotativo, donde la teoría general de la relatividad debe ser usada para realizar los cálculos apropiados.

La explicación del fenómeno es la siguiente. Nuevamente se considera el disco rotando con una velocidad angular omega perpendicular al plano del disco. En un cierto punto del perímetro (designado como 1) fotones idénticos se envían en ambos sentidos del anillo a la largo de su perímetro. Si la velocidad angular es cero, entonces ambos fotones verán que el camino es de la misma longitud, cubriendo una distancia (hasta llegar nuevamente al punto 1) de $2 \cdot \pi \cdot R$. Si ahora el anillo se encuentra rotando, al llegar ambos fotones al punto 1 uno va a tardar un tiempo t_{ccw} (counterclockwise) y el otro un tiempo t_{cw} (clockwise). Las ecuaciones vienen dadas por:

$$L_{ccw} = 2 \cdot \Pi \cdot R - R \cdot \Omega \cdot t_{ccw} = c_{ccw} \cdot t_{ccw} \quad (Ec. 10)$$

$$L_{cw} = 2 \cdot \Pi \cdot R + R \cdot \Omega \cdot t_{cw} = c_{cw} \cdot t_{cw} \quad (Ec. 11)$$

$$\Delta t = t_{ccw} - t_{cw} = \left(4 \cdot \frac{A}{c}\right) \cdot \Omega \quad (Ec. 12)$$

Cuando se divide un rayo de luz y luego se recombina, se forma una interferencia. El modelo de interferencia obtenido dependerá de la velocidad de rotación. Si se supone que no ha habido rotación, los dos rayos estarían en fase por lo que conseguirá interferencia constructiva que se representaría con un punto blanco.

Por lo contrario si se ha producido una rotación los rayos ya no estarían en fase por lo que se obtendría interferencia destructiva y por lo tanto un punto negro.

A continuación se representa en forma grafica:



Figura 24: Tipos de interferencia producidas al recombinar dos rayos de luz

APLICACIONES DE LOS GIROSPOCOS

Aplicaciones de giroscopios incluyen navegación (INS) cuando brújulas magnéticas no funcionan o no son suficientemente precisos (como en misiles balísticos intercontinentales) o para estabilización de equipos voladores, como los helicópteros de radio control o vehículos aéreos no tripulados. Debido a una mayor precisión, giróscopos también se utilizan para mantener la dirección en la minería del túnel.

Giróscopos puede ser utilizados para construir gyrocompasses que complementa o sustituyen las brújulas magnéticas (en los buques,

aeronaves y naves espaciales, vehículos en general), para contribuir a la estabilidad (bicicleta, telescopio espacial Hubble, barcos, vehículos en general), o ser parte de un sistema de guía inercial. Efecto giroscópico se utiliza juguetes como trompos, boomerangs, yo-yos, y powerballs. Muchos otros dispositivos de rotación, como volantes de inercia, se comportan giroscópicamente aunque el efecto giroscópico no se utiliza.

Indicador de actitud.

El indicador de actitud, también llamado horizonte artificial, es un instrumento que muestra la actitud del avión respecto al horizonte. Su función consiste en proporcionar al piloto una referencia inmediata de la posición del avión en alabeo y profundidad; es decir, si está inclinado lateralmente, con el morro arriba o abajo, o ambas cosas, con respecto al horizonte. La incorporación del horizonte artificial a los aviones ha sido fundamental para permitir el vuelo en condiciones de visibilidad reducida o nula.

Este instrumento opera en base a una propiedad giroscópica, concretamente la de rigidez en el espacio.



Figura 25: Horizonte artificial

Construcción.

El horizonte artificial consta de un giróscopo de rotación horizontal montado sobre un sistema de ejes que le confieren tres grados de libertad (montaje universal), dentro de una caja hermética. Este giróscopo tiene fijada una esfera visible, con una barra horizontal de referencia a la altura del eje de giro, por encima de la cual la esfera es de color azul (cielo) y por debajo marrón (tierra).

Este aparato está conectado al sistema de succión, necesario para producir la corriente de aire que incide sobre los alabes del rotor y hace girar este a unas 16.000 r.p.m. aproximadamente.

En el frontal de la caja, se fija un dial de presentación con un avioncito en miniatura y una escala graduada en el semicírculo superior. Las marcas de esta escala están separadas de 10° en 10° entre 0° y 30° , con unas marcas más anchas representando 30° , 60° y 90° . En algunos indicadores, la escala graduada se encuentra en la esfera del giróscopo.

Este instrumento puede contar también con unas marcas horizontales por encima y por debajo de la barra del horizonte, como referencias de la actitud de cabeceo del avión, marcas que suelen indicar 5° , 10° , 15° y 20° de morro arriba o abajo.

Adosado a la caja se encuentra un botón giratorio de ajuste del avioncito.

Cuando el avión se incline hacia un lado u otro, suba o baje el morro, o cualquier otro movimiento combinado, la caja y su dial con el avioncito en miniatura realizará el mismo movimiento. Pero por la propiedad de rigidez en el espacio, el giróscopo debe permanecer siempre paralelo al horizonte, y con él su esfera visible con la barra horizontal. De esta manera se proporciona al piloto la referencia del horizonte y la actitud del avión respecto al mismo. La relación del avión miniatura con el horizonte de referencia es la misma que la del avión con el horizonte real.

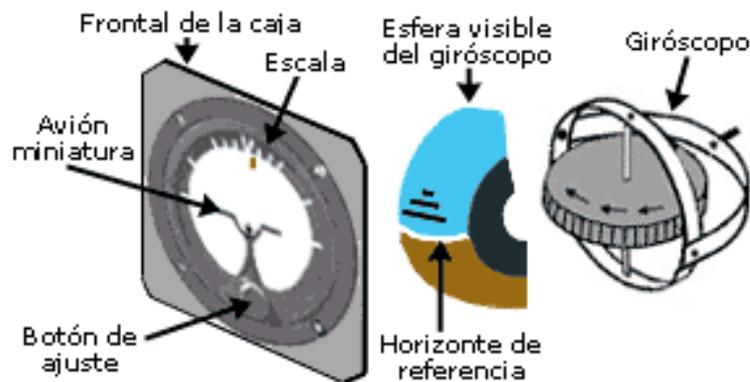


Figura 26: Componentes del horizonte artificial

Indicador de dirección

También llamado direccional giroscópico o direccional, este instrumento proporciona al piloto una referencia de la dirección del avión, facilitándole el control y mantenimiento del rumbo.

El desplazamiento de un lugar a otro en avión, se realiza a través de una ruta aérea previamente elaborada, la cual se compone de uno o más tramos, en los cuales para llegar de un punto al siguiente ha de seguirse una determinada dirección o rumbo, es decir, el piloto debe "navegar" a través del aire para seguir esa ruta.

Antes de la aparición del indicador de dirección, los pilotos navegaban sirviéndose de la brújula, y a la vista de las proezas narradas, con bastante eficiencia. Pero la brújula es un instrumento que puede dar lugar a numerosos errores, exigiendo mucha atención y una lectura adecuada, pues son muchos los efectos que alteran su funcionamiento y dan lugar a interpretaciones erróneas. Por ejemplo, no es muy fácil realizar un giro con precisión en base a la brújula, particularmente si el aire es turbulento.

Sin embargo, el indicador de dirección es inmune a las causas que hacen dificultosa la lectura de la brújula, lo que le hace el instrumento adecuado para mantener el control direccional del avión o su rumbo, pues sus indicaciones son más precisas y fiables que las de la brújula. Este instrumento proporciona una indicación de dirección estable y relativamente libre de errores.



Figura 27: Indicador de dirección

Construcción.

Este instrumento consiste en un giróscopo cuyo eje de rotación es vertical, acoplado al cual se encuentra una rosa de rumbos graduada de 0° a 359°. La caja del instrumento tiene incrustado en su frontal visible un pequeño avión

montado verticalmente cuyo morro siempre apunta al rumbo del avión. Asimismo, dispone de un botón giratorio para ajustar el rumbo.

Al efectuar un cambio de dirección, la caja del instrumento se mueve al unísono con el avión, pero el giróscopo debido a su rigidez en el espacio continua manteniendo la posición anterior. Este desplazamiento relativo de la caja respecto del eje vertical del rotor se transmite a la rosa de rumbos, haciéndola girar de forma que muestre en todo momento el rumbo, enfrentado al morro del avión de miniatura.

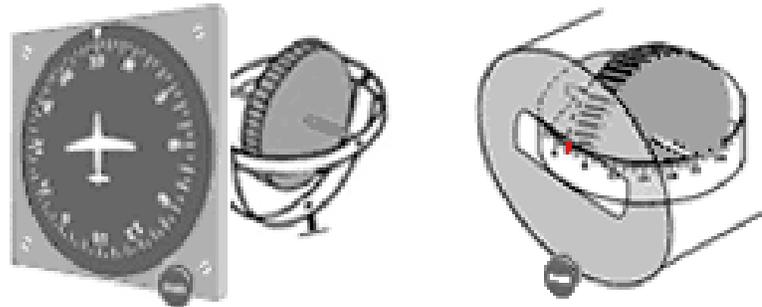


Figura 28: Indicadores de dirección

Hay otro tipo de indicadores de dirección, que en lugar de la rosa de rumbos giratoria disponen de una carta de rumbos circular, dispuesta en forma horizontal, que muestra en una ventanilla el rumbo, de forma parecida a como se muestra en la brújula. Cuando el aeroplano gira sobre su eje vertical, la carta de rumbos mantiene el eje marcando el nuevo rumbo.

La rosa de rumbos está graduada en incrementos de 5 grados, con números cada 30 grados, y en algunos casos los puntos cardinales indicados por N(orte), S(ur), E(ste) y W(est=Oeste).

Indicador de viraje/coordinación

Este aparato consta realmente de dos instrumentos independientes ensamblados en la misma caja: el indicador de viraje y el indicador de coordinación de viraje.

Este fue uno de los primeros instrumentos usados por los pilotos para controlar un aeroplano sin referencias visuales al suelo o al horizonte. El indicador de viraje tenía la forma de una gruesa aguja vertical o "bastón" y el indicador de coordinación consistía en una bola dentro de un tubo, recibiendo por ello la denominación de "bola". Al conjunto del instrumento se le denominaba "bastón y bola".

Hoy en día el indicador de viraje tiene la forma del perfil de un avión en miniatura, y el indicador de coordinación sigue teniendo la misma presentación mediante una bola. El instrumento en su conjunto recibe el nombre de coordinador de giro (turn coordinator), aunque la denominación coloquial "bastón y bola" se sigue empleando de forma indistinta, puesto que ambos instrumentos muestran la misma información pero de forma diferente.

Como casi siempre, la nomenclatura es amplia, a veces confusa y no siempre acertada. Al indicador de viraje también se le denomina indicador de inclinación, indicador de giro, o "bastón". Al indicador de coordinación de giro, se le denomina a veces inclinómetro, indicador de resbales y derrapes, indicador de desplazamiento lateral, o "bola".

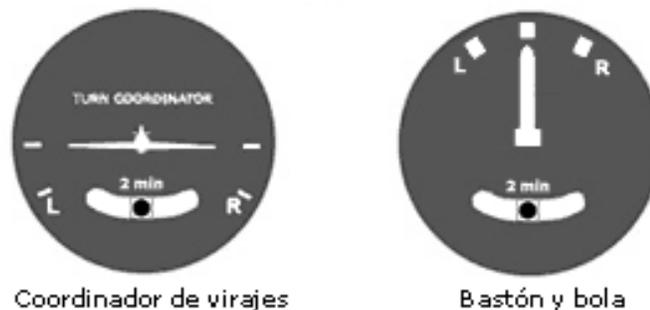


Figura 29: Indicador de viraje y coordinación

Velocidad angular de viraje.

Por velocidad angular de viraje o ratio de viraje se entiende el número de grados por segundo que gira el avión sobre un eje vertical imaginario. Si para realizar un giro de 90° se tardan 30 segundos, la velocidad angular o ratio de viraje es de 3° por segundo ($90^\circ/30''=3^\circ$ p/segundo).

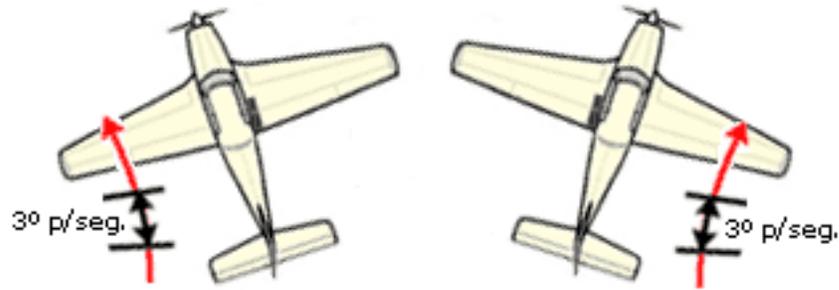


Figura 30: Velocidad angular o ratio de viraje

Indicador de viraje.

El indicador de viraje, en forma de avión miniatura o de "bastón", muestra si el avión está girando, hacia que lado lo hace y cual es la velocidad angular o ratio del viraje.

Otra función del indicador de viraje consiste en servir como fuente de información de emergencia en caso de avería en el indicador de actitud (horizonte artificial), aunque este instrumento no dé una indicación directa de la actitud de alabeo del avión. Conviene tener claro que el horizonte artificial señala la inclinación (alabeo) del avión en grados mientras que el bastón indica en grados el régimen de viraje: son dos cosas distintas.

Este instrumento esta constituido por un giróscopo, cuyo rotor es accionado por el sistema de vacío (girosucción) o eléctricamente. El giróscopo se monta por lo general en un ángulo de 30° , de forma semirígida, lo cual le permite girar libremente sobre los ejes lateral y longitudinal, pero teniendo restringido el giro alrededor del eje vertical.

Un muelle acoplado al giróscopo mantiene a este vertical cuando no se le aplica ninguna fuerza deflectiva. En algunas ocasiones, este muelle es ajustable para permitir la calibración del instrumento para una determinada tasa de giro. Adicionalmente, un mecanismo de amortiguación impide las oscilaciones excesivas del indicador.

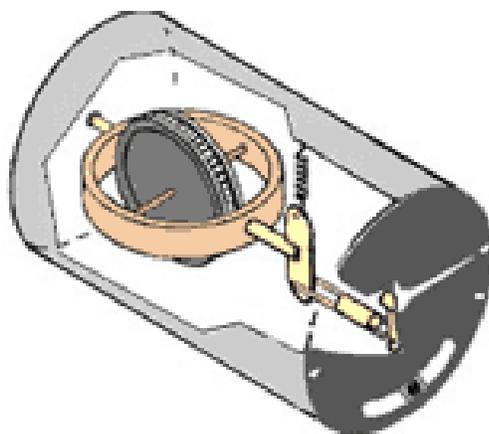


Figura 31: Coordinador de viraje

Cuando el aeroplano gira alrededor de su eje vertical, la deflexión aplicada al giróscopo hace que este precesione, lo cual se traduce en el movimiento del indicador, es decir que el avión en miniatura que aparece en el dial del instrumento se ladee hacia la izquierda o hacia la derecha. A medida que la tasa de giro se incrementa también lo hace la fuerza de precesión. Cuanto más rápido sea el viraje, mayor será la precesión y el ladeo del avión miniatura.



Figura 32: Funcionamiento del indicador de Viraje

En el dial del instrumento, además del avión miniatura o el bastón, hay una marca central vertical en el caso del bastón o dos marcas centrales horizontales en el caso del coordinador, y en ambos casos una marca a cada lado con las letras L (Left=Izquierda) y R (Right=Derecha) respectivamente. Si el avión gira a la izquierda, el bastón se desplazará hacia la marca de la izquierda (L) o el avioncito se ladeará hacia la marca de ese lado; si el viraje es a la derecha, sucederá lo mismo respecto a la marca de la derecha (R).

Hay dos tipos de indicador de viraje: de 2 minutos y de 4 minutos. Esto quiere decir que un giro de 360° requiere 2 minutos para completarse, o lo que es lo mismo el avión gira a una tasa de 3° por segundo ($360^\circ/120$ segundos). De la misma manera, en el indicador de 4 minutos, la tasa de giro sería de $1,5^\circ$ por segundo ($360^\circ/240$ segundos).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MANZANERES DEL MORAL ALBERTO. Estudio de Modelos Matemáticos de Acelerómetros Comerciales. España, (Tesis de Pregrado). Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla.
- [2] POZO ESPÍN DAVIC FERNANDO. (2010). Diseño y Construcción de una Plataforma Didáctica Para Medir Ángulos de Inclinación Usando Sensores Inerciales Como Acelerómetros y Giroscopios. Quito, (proyecto previo a la obtención del título de ingeniero en electrónica y control). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- [3] NATIONAL SANDIA LABORATORIES.(2005-2008). “Bugs on MEMS”, Disponible en <http://mems.sandia.gov/gallery/images_bugs_on_mems.html>
- [4] FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. (2007). Instrumentos Inerciales. Disponible en <<http://laboratorios.fi.uba.ar/lsscm/espana/apuntes/CLASE0.pdf>>
- [5] QUERO REBOUL JOSÉ MANUEL. (2012). Evaluación de un Giroscopio MENS en un Péndulo. España, (contenido curso 2011-2012). Microsistemas, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla.
- [6] ÁVILA DE LA TORRE MARCOS. (2005). Sensores de Velocidad.
- [7] CABRERA RICARDO.(noviembre, 2006). Cinemática escalar. Buenos Aires, Argentina. Disponible en <http://neuro.qi.fcen.uba.ar/ricuti/No_me_salén/CINEMATICA/AC_escalar.html> [Consulta 28 de febrero de 2013]
- [8] Ejemplo de Cálculo de Perforación Direccional. (enero 20, 2001). Disponible en < <http://achijj.blogspot.com/2011/01/ejemplo-de-calculo-de-perforacion.html>> [Consulta 1 de marzo, 2013]

[9] BELTRÁN AYALA JOAN MARCELO. (2005). Diseño y construcción de un Simulador de Sensores de un Pozo Direccional. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctricas, Electrónica y Telecomunicaciones. Bucaramanga.

[10] CALCULATE DOGLEG SEVERITY BETWEEN 2 SURVEY POINTS BASED ON RADIUS OF CURVATURE METHOD. Disponible en <www.drillingformulas.com/dogleg-severity-calculationbased-on-radius-of-curvature-method/>, [Consulta 2 de diciembre de 2012]

[11] TANGENCIAL METHOD. (En línea), disponible en <<http://www.drillingformulas.com/tangential-method-calculation/>> [consulta 2 de diciembre de 2012]

[12] BALANCED TANGENCAL METHOD. (En Línea), Disponible en <www.drillingformulas.com/balanced-tangencial-method-calculacion/>, [consulta 3 de diciembre de 2012]

[13] ANGLE-AVARAGING-METHOD. (En línea), disponible en <<http://www.drillingformulas.com/angle-averagingl-method-calculation/>> [consulta 3 diciembre 2012]

[14] MINIMUM CURVATURE METHOD. Disponible en <www.drillingformulas.com/minimun-curvature-method/>,[Consulta 3 de diciembre de 2012]

[15] PILLAJO OBANDO MARCELO FERNANDO, ROBAYO CAJAMARCA SIXTO BOLÍVAR. (2012). Desarrollo de un “Guante Electrónico de Datos” con Sensores Inerciales, Herramientas de Open Source y Comunicación Inalámbrica, que Interactúe con Imágenes del Cuerpo Humano en 3D para el Proyecto “Sistema de Entrenamiento Virtual para Medicina”. (Tesis previa a la obtención del título de ingeniero de sistemas). Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campo Sur.

[16] GARCÍA JOSÉ MÍLERES JR Dr., AMBROSIO LÁZARO ROBERTO CARLOS Dr., GARCÍA ANDRADE MIGUEL ÁNGEL Dr., RINCO JARA RODOLFO IVÁN. (2009). Desarrollo de Electrónica y Acondicionamiento de Señales de Acelerómetros de MENS. (Tesis previa a la obtención del título maestría).

[17] PARALLAX INC. Sensores Inteligentes y sus Aplicaciones, Guía del Estudiante, Versión 1.0 (versión en español)

[18] WEST INSTRUMENTS DE MEXICO, S.A., Manual de Aplicación de Encoders. Una Guía de Referencia y Tutoría Sobre Encoders Para el Control de Movimiento: Tipos, Tecnologías, Aplicaciones e Instalaciones

[19] BUSCHIAZZO ANDRES. (2011). Mantenimiento Instrumental I, Unidad Complementaria 5 “Encoders”. Facultad Regional de Córdoba.